

# Simulación del comportamiento no-lineal de materiales compuestos

## Trabajo Final de Grado



Facultad de Náutica de Barcelona  
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:  
**Albert Ruiz Serrano**

Dirigido por:  
**Joel Jurado Granados**

Grado en Ingeniería en Sistemas y Tecnología Naval

Barcelona, Julio de 2017

Departamento de ciencia e ingeniería náuticas



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Facultat de Nàutica de Barcelona







---

# Agradecimientos

Quisiera agradecer en primer lugar a mis padres y familia todo el sacrificio que han hecho para facilitarme la posibilidad de acceder y realizar unos estudios superiores y por su inagotable comprensión, apoyo y consejo siempre que lo he necesitado.

También debo agradecer a la Facultad de Náutica de Barcelona y a todos sus docentes los conocimientos y experiencias que me han proporcionado durante el periodo que cierro junto con este trabajo. Gracias a ellos, he podido descubrir infinidad de materias y temáticas desconocidas por mi hasta entonces y esto ha aumentado constantemente mi interés por hacer carrera en el sector naval. Quiero hacer especial mención a el Profesor Joel Jurado Granados, que ha sido mi director de proyecto. Él me ofreció una segunda oportunidad para acabar mis estudios este curso y descubrió con ella una temática que ha resultado ser extraordinariamente interesante para mí. Además, debo agradecerle la absoluta implicación con el proyecto y la infinidad de horas de tutoría empleadas; mostrándome un temario totalmente nuevo para mí, solucionando todas mis dudas y guiándome durante todo este recorrido. Sin su ayuda, hubiese sido inviable acabar un trabajo como éste en un tiempo tan limitado.

Asimismo, mencionar a mis compañeros y amigos, que han compartido conmigo incontables horas de preparación y estudio; junto con extraordinarios momentos fuera del ámbito académico.

Por último, quisiera agradecer su gran apoyo, paciencia y optimismo a Ivanna. Ella ha sido personalmente un pilar fundamental para poder alcanzar mis objetivos en estos últimos meses.



---

# Resumen

Este trabajo se divide en diez capítulos que, a su vez, podrían dividirse en dos partes diferenciadas. En los cinco primeros capítulos se centra la atención en introducir al lector en el ámbito de los materiales compuestos. De esta forma, proporciona los conocimientos necesarios para la comprensión de la segunda parte del trabajo. Estos primeros capítulos tratan de diversos temas, primero se presenta el tema del trabajo y la metodología seguida para conseguir lograr los objetivos esperados. Seguidamente, una pequeña revisión de la evolución de los materiales compuestos centrada en el sector naval denotará la proyección que tuvieron y que tendrán este tipo de materiales. A continuación, se exponen los modelos de comportamiento que existen para describir cómo reaccionan los materiales compuestos al aplicarles una determinada carga y así poder entender el posterior tratamiento que se hará de ellos. Esto enlaza con una exposición de las teorías y métodos numéricos que se emplearán para la simulación del comportamiento de estos materiales mediante programas informáticos de cálculo numérico por elementos finitos, también se presentan y caracterizan los diferentes materiales constitutivos que conforman el compuesto objeto de estudio. Para concluir esta primera parte, se exponen los principales tipos de ensayos que existen hoy en día para conocer de forma empírica el comportamiento de los materiales compuestos. La segunda parte del trabajo inicia en el capítulo seis. En ella se presentan los modelos y ensayos que han sido utilizados como referencia para la posterior simulación de estos mediante el software empleado, indicando como han sido tratados a través de la interfaz. Seguidamente se expone el procedimiento seguido durante la validación, esto enlaza con el capítulo donde se muestran los resultados obtenidos gracias al programa informático y se documenta cómo han sido validados, comentando aspectos de los propios resultados. Por último, se ha reservado el capítulo final para las conclusiones obtenidas después de todo el estudio previo del campo de trabajo y de la obtención de los resultados.

## Abstract

This work is divided into ten chapters which, at the same time, they could be distinguished in two parts. The first five chapters are focused on introducing the reader in the field of composite materials. Thus, it gives in advance the required knowledge for understanding well the second part. These first chapters explain different issues. First, it introduces the subject of the work and the followed methodology in order to achieve the desired objectives. Next, there is a brief review of the composite materials' evolution, focused in the naval sector, where it will be explained the significance that they had and they will have in the future. Then, it is shown the existing behavior model to describe how the composite materials react when we apply a certain load and, by this way, understand their subsequent treatment. This is a link with a presentation of the numerical methods and theories which will be used for the simulation of the behavior of these materials through computer programs of numerical computation by the finite element method. As well, there are showed and distinguished the different constituent materials which will be the subject matter. To conclude this first part, there are exposed the main types of contemporary tests to know empirically the composite materials' behavior.

The second part of this work starts at chapter six and there it is shown the models and tests, which had been employed as a reference for the following simulation of them by the used software, stating how they were treated through the interface. Right after, there are showed the results obtained thanks to the computer program and it is explained how they were validated, remarking some aspects of the own results. Lastly, it was reserved the final chapter for the conclusions obtained after all the preliminary study of the field of work and after the achievement of the results.



---

# Índice

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE	VII
LISTADO DE FIGURAS	XI
LISTADO DE TABLAS	XIV
<b><u>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	3
<b><u>CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN A LOS LAMINADOS EN EL ÁMBITO NAVAL</u></b>	<b><u>5</u></b>
2.1 HISTORIA	5
2.2 ACTUALIDAD	6
2.3 FUTURO	8
<b><u>CAPÍTULO 3. MODELOS UTILIZADOS PARA SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES</u></b>	<b><u>11</u></b>
3.1 ELASTICIDAD	11
3.2 PLASTICIDAD	12
3.3 DAÑO	14
<b><u>CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS</u></b>	<b><u>17</u></b>
4.1 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS: TEORÍA DE MEZCLAS SERIE/PARALELO	17
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS	21
<b><u>CAPÍTULO 5. ENSAYOS REALIZADOS A MATERIALES COMPUESTOS</u></b>	<b><u>23</u></b>
5.1 INTRODUCCIÓN	23

<b>5.2 ENSAYOS DESTRUCTIVOS</b>	<b>25</b>
5.2.1 TRACCIÓN	25
5.2.2 COMPRESIÓN	26
5.2.3 CORTANTE	27
5.2.4 FLEXIÓN	28
5.2.5 DELAMINACIÓN	28
<b>5.3 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS</b>	<b>29</b>
5.3.1 INSPECCIÓN VISUAL	30
5.3.2 INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS	30
5.3.3 INSPECCIÓN POR TERMOGRAFÍA	31
 <b>CAPÍTULO 6. MODELO PROPUESTO PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE MATERIALES COMPUESTOS</b>	 <b>33</b>
 <b>6.1 DATOS DEL ENSAYO</b>	 <b>33</b>
6.1.1 GEOMETRÍA DE LA PROBETA	33
6.1.2 CONFIGURACIÓN DEL LAMINADO	34
6.1.3 PROPIEDADES ELÁSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS	34
6.1.4 PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS PRESENTADOS EN EL ENSAYO DE REFERENCIA	35
<b>6.2 DATOS PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA</b>	<b>36</b>
6.2.1 CONFIGURACIONES PRELIMINARES	36
6.2.2 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA	37
6.2.3 DEFINICIÓN DEL LAMINADO	38
6.2.4 DESPLAZAMIENTO IMPUESTO	39
6.2.5 PROPUESTA DE LAS PROPIEDADES NO-LINEALES DE LOS MATERIALES	39
6.2.5.1 MODELO DE COMPORTAMIENTO QUE SIGUE CADA MATERIAL	39
6.2.5.2 PROPIEDADES NO-LINEALES DE LOS MATERIALES	40
6.2.6 CONDICIONES DE CONTORNO IMPUESTAS EN EL MODELO	41
6.2.7 CONDICIONES DE MALLADO DEL MODELO	43
 <b>CAPÍTULO 7. PROCEDIMIENTO SEGUIDO PARA LA CALIBRACIÓN DEL MATERIAL</b>	 <b>45</b>
 <b>CAPÍTULO 8. RESULTADOS DEL MODELO</b>	 <b>49</b>
 <b>8.1 MÉTODOS PARA VISUALIZAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS</b>	 <b>49</b>
<b>8.2 DATOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS</b>	<b>52</b>
8.2.1 DESPLAZAMIENTOS	52
8.2.2 DEFORMACIONES DEL COMPUESTO	54
8.2.3 DAÑO GENERADO EN FIBRA Y MATRIZ	55

---

8.2.4 TENSIONES SOPORTADAS	56
8.2.5 CURVAS TENSIÓN/DEFORMACIÓN OBTENIDAS	58
<b>CAPÍTULO 9. DOCUMENTACIÓN DE LA VALIDACIÓN</b>	<b>65</b>
<b>9.1 DEFINICIÓN EN RAMSERIES DE LA GEOMETRÍA DESEADA</b>	<b>65</b>
<b>9.2 INTRODUCCIÓN DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO</b>	<b>67</b>
<b>9.3 ASIGNACIÓN DEL MATERIAL DEL QUE ESTÁ CONFORMADA LA GEOMETRÍA</b>	<b>68</b>
<b>9.4 DEFINICIÓN DEL MALLADO Y SUS PROPIEDADES</b>	<b>69</b>
<b>9.5 CÁLCULO DEL CASO CREADO Y MODIFICACIÓN DEL ARCHIVO .DAT QUE SE GENERA</b>	<b>70</b>
<b>9.6 CÁLCULO DEL CASO CON EL EJECUTABLE Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS EN EL POSTPROCESO</b>	<b>73</b>
<b>CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES</b>	<b>75</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>81</b>

---



---

# Listado de Figuras

Figura 1 Embarcación egipcia construida en materiales compuestos – Fuente [3] .....	6
Figura 2. Embarcación de recreo de mediana eslora fabricada en composites – Fuente [5].....	7
Figura 3. Detalle composición en materiales compuestos de riser utilizado en la industria Off-shore. (Reducen el peso que aumentaría al aumentar el espesor solicitado para alcanzar mayores profundidades) – Fuente [6].....	8
Figura 4. Construcción íntegra en compuestos de la cubierta de mando y control del destructor de última generación de la Armada Estadounidense – Fuente [8].....	10
Figura 5. Diagrama tensión/deformación para modelo elástico - Fuente propia .....	12
Figura 6. Diagrama tensión/deformación. Diferencia endurecimiento vs ablandamiento - Fuente propia .....	13
Figura 7. Diagrama tensión/deformación para modelo plástico - Fuente propia .....	14
Figura 8. Diagrama tensión/deformación para modelo daño - Fuente propia.....	15
Figura 9. Laminado con fibras en la dirección longitudinal (eje X) - Fuente propia .....	19
Figura 10. Diagrama tensión/deformación en la dirección de $\sigma_x$ . En paralelo - Fuente propia...	20
Figura 11. Diagrama tensión/deformación en la dirección $\sigma_y$ . En serie - Fuente propia .....	20
Figura 12. Tablas 1 y 2 de la referencia [11]. Propiedades mecánicas de fibra y matriz .....	22
Figura 13. Detalle de un ensayo de tracción a una probeta de composite - Fuente [16] .....	26
Figura 14. Ensayo a compresión de probeta dañada de material compuesto – Fuente [17].....	27
Figura 15. Esquema del ensayo Iopescu – Fuente [15].....	27
Figura 16. Ensayo de flexión a 3 puntos de material compuesto – Fuente [18] .....	28
Figura 17. Diferentes formas de aplicar la fuerza para generar delaminación - Fuente [15].....	29
Figura 18. Detalle de ensayos por ultrasonidos (derecha) y por termografía (izquierda) – Fuente [17] .....	31
Figura 19. Imagen descriptiva de la geometría escogida - Fuente [11] .....	33
Figura 20. Configuración del laminado seleccionado para su simulación - Fuente [11] .....	34
Figura 21. Curva tensión/deformación del ensayo – Fuente [11] .....	36
Figura 22. Geometría creada en el software - Fuente propia.....	38

Figura 23. Consideración del compuesto según el software - Fuente propia .....	38
Figura 24. Detalle del elemento (línea subrayada) donde se aplica la condición de contorno 1 - Fuente propia.....	41
Figura 25. Detalle del elemento (línea subrayada) donde se aplica la condición de contorno 2 – Fuente propia.....	42
Figura 26. Detalle del elemento (superficie coloreada) donde se aplica la condición de contorno 3 - Fuente propia.....	42
Figura 27. Detalle del elemento (superficie coloreada) donde se aplica la condición de contorno 4 - Fuente propia.....	43
Figura 28. Malla generada en la geometría - Fuente propia .....	43
Figura 29. Detalle del icono de GiD que permite pasar de pre a postproceso y viceversa - Fuente propia .....	49
Figura 30. Ejemplo del proceso de selección a seguir para graficar los resultados del programa mediante la herramienta “graphs” que incluye (En imagen, selección de la variable a representar en el eje X) - Fuente propia.....	50
Figura 31. Ejemplo de una gráfica mostrada con la herramienta de GiD descrita - Fuente propia .....	51
Figura 32. Detalle de la ventana "Graph values" y cómo desplegarla dentro de la pestaña "Options" de la ventana "Graphs window" - Fuente propia .....	51
Figura 33. Detalle de la ventana de resultados que facilita el software – Fuente propia.....	52
Figura 34. Resultados del desplazamiento en la dirección X - Fuente propia .....	53
Figura 35. Resultados del desplazamiento en la dirección Y - Fuente propia .....	53
Figura 36. Resultados del desplazamiento en la dirección Z - Fuente propia .....	54
Figura 37. Resultados de las deformaciones sufridas en las direcciones X,Y,Z - Fuente propia ..	54
Figura 38. De izquierda a derecha, valor de daño sufrido en fibra 1, fibra 2, matriz 1, matriz 2 - Fuente propia.....	55
Figura 39. Resultados de las tensiones sufridas por el compuesto en la dirección X - Fuente propia .....	56
Figura 40. Resultados de las tensiones sufridas por la Fibra 1 (Sx) y la Fibra 2 (Sy) - Fuente propia .....	57
Figura 41. Resultados de las tensiones sufridas por la Matriz 1 (Sx) y la Matriz 2 (Sy) - Fuente propia .....	58

---

Figura 42. Representación de las curvas tensión/deformación, en la dirección de aplicación de la tensión, de los diferentes componentes del compuesto del software, del compuesto generado en el software y del compuesto ensayado – Fuente propia .....	60
Figura 43. Representación de las curvas tensión/deformación, en la dirección perpendicular a la de aplicación de la tensión, de los diferentes componentes del compuesto del software, del compuesto generado en el software y del compuesto ensayado – Fuente propia .....	62
Figura 44. Comparación de resultados de la curva del ensayo vs resultados de la curva del software - Fuente propia.....	63
Figura 45. Superficie creada con RamSeries siguiendo el procedimiento expuesto – Fuente propia .....	65
Figura 46. Menú de la función "Copy" configurado para el caso explicado - Fuente propia .....	66
Figura 47. Detalle de la selección en el menú de RamSeries para poder editar en el menú de condiciones de contorno – Fuente propia .....	68
Figura 48. Menú para asignar las condiciones de contorno a la geometría - Fuente propia .....	68
Figura 49. Detalle del menú de asignación de material en RamSeries - Fuente propia .....	69
Figura 50. Detalle de las selecciones a realizar para la definición del mallado. De arriba abajo: Selección de la forma de definición del mallado, determinación del tamaño de elemento y selección del tipo de elemento – Fuente propia .....	70
Figura 51. Izquierda: detalle del botón a clicar para calcular. Derecha: mensaje que aparece una vez finalizado el cálculo - Fuente propia .....	70
Figura 52. Detalle del botón para desplegar la ventana “info” durante el cálculo del software - Fuente propia .....	71

## Listado de Tablas

Tabla 1. Propiedades de los materiales constitutivos del ensayo - Fuente [11] .....	35
---	----



# Capítulo 1. Introducción, objetivos y metodología

## 1.1 Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, los materiales compuestos han formado parte del abanico de posibles materiales de construcción de la mayoría de elementos existentes en la sociedad. Herramientas, edificaciones e invenciones se fueron implementando e incluyendo era tras era gracias a la aparición de nuevos materiales, parte de ellos compuestos. Gracias a esto entre otras muchas cosas, ha sido posible la evolución del ser humano hasta nuestros días. Se está observando que, desde hace décadas, el uso de los materiales compuestos de nueva generación va incrementándose notablemente. Esto es debido gracias al hecho de que los compuestos tienen una serie de características especiales que los hacen más ventajosos, frente a las alternativas de materiales simples isótropos, para su utilización en determinadas aplicaciones estructurales. Altas relaciones resistencia-peso y rigidez-peso, resistencia a la corrosión y a ataques químicos, estabilidad térmica, etc; hacen que la aplicación de los materiales compuestos resulte especialmente adecuada en la conformación de estructuras en las que, por ejemplo, el peso sea una variable crítica, o que estén expuestas a un medio ambiente agresivo que influya en su degradación, o que precisen de gran rigidez, o en construcciones en formas complejas, o en industrias que precisen un alto índice de producción.

Entonces, resulta prácticamente obvio al leer el anterior listado de aplicaciones que el uso de los materiales compuestos podría tener una gran proyección en gran parte de las construcciones navales que se están realizando en la actualidad y en las que se pretende realizar en un futuro. La industria naval se encuentra actualmente en búsqueda de soluciones constructivas para producir buques que tengan igual o mayor resistencia, pero reduciendo el peso total de la estructura de la embarcación para poder ayudar a reducir así también el consumo de combustible, los costes operativos y las emisiones contaminantes. También se buscan métodos constructivos que reduzcan en la medida de lo posible los tiempos de producción y por ende los costes de fabricación. Y que permitan una producción en cadena sin que por esta razón se vea reducida la calidad final del producto que ofrecen.

Por otro lado, los avances tecnológicos del sector *off-shore* han conllevado un aumento de construcciones destinadas a este fin. Las estructuras *off-shore* y sus complementos están sometidas periódicamente a lo largo de su vida útil a la intemperie y a unas condiciones ambientales que pueden llegar a ser, en determinados periodos del año, extremas. Son estructuras que requieren resistir perseverantemente los golpes de la mar y del viento, incluso cuando hay temporales, que solicitan mantener una buena estabilidad pese a las condiciones adversas a las que se enfrentan y que, debido a la propia evolución de la tecnología y a la explotación de los recursos no renovables, cada vez necesitan alcanzar profundidades mayores. Es por todas estas situaciones por las que el empleo de los materiales compuestos para la construcción de dichas estructuras, o parte de ellas y de sus complementos, puede ser favorable. De esta forma se obtienen estructuras más livianas, con una mayor estabilidad, mucho más resistentes a las condiciones ambientales que van a sufrir y capaces de alcanzar profundidades superiores.

En el presente trabajo, se centra el punto de vista en el estudio y predicción del comportamiento de los materiales compuestos. Cosa que se puede obtener a partir de ensayos experimentales o a partir de herramientas numéricas de simulación. El trabajo se centrará en las segundas.

El discernimiento del comportamiento de los materiales compuestos resulta necesario debido a la complejidad intrínseca que presentan los propios materiales y a la complejidad de las estructuras que se construyen con *composites*. También resulta necesario debido a el constante deseo de optimización de los materiales que tienen sus propios fabricantes, los constructores de productos elaborados con compuestos y el usuario final del producto. Los materiales compuestos presentan, igual que la mayoría de materiales, un comportamiento inicialmente elástico – lineal que pasará a ser no-lineal una vez alcanzado el valor de tensión de su límite elástico. Hasta hace relativamente poco tiempo, las formulaciones empleadas para la simulación del comportamiento de los materiales compuestos solo eran válidas para el rango lineal del material. De esta forma, existía un grave problema a la hora de predecir el comportamiento del material en su rango no-lineal, dejándolo por desconocido. Así, se conocía la resistencia estructural y el comportamiento de un elemento construido en compuestos siempre y cuando las cargas y tensiones que soportase estuvieran por debajo de su límite elástico. Pero si sufría una carga mayor al valor de este límite, se desconocía por completo cómo iba a reaccionar. Gracias a la investigación de dicha problemática, en la actualidad existen teorías capaces de predecir el comportamiento en el rango no-lineal de los materiales compuestos como, por ejemplo, la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo. Esta teoría considera el material compuesto como un conjunto de materiales componentes y predice la respuesta general del material a partir del comportamiento de sus diferentes constituyentes.

## 1.2 Objetivos y metodología

El objetivo principal de este trabajo es el de documentar la simulación de materiales compuestos que se realizará a partir de la formulación de la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo, con el fin de obtener numéricamente el comportamiento tanto del rango lineal como del rango no-lineal de los materiales compuestos estudiados. Además, se pretende validar la implementación realizada de dicha formulación en el código *RamSeries* de la compañía *Compass* [1]. El comportamiento de los materiales se calibrará a partir de datos de ensayos empíricos obtenidos de bibliografía existente. El objetivo final del trabajo pretende documentar y afirmar que la formulación existente es capaz de modelizar la conducta de este tipo de materiales a través de los modelos constitutivos de los materiales constituyentes. Cabe indicar que la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo ha sido implementada por el Equipo de Investigación de Compuestos en CIMNE [2].

Para lograr alcanzar estos objetivos se deberá seguir y completar una serie de hitos que se listan a continuación:

- Búsqueda y estudio de bibliografía sobre la temática a presentar: Materiales compuestos en general, empleo de materiales compuestos en el ámbito naval, teorías y métodos numéricos para la simulación del comportamiento de materiales compuestos, datos sobre ensayos empíricos realizados a compuestos, etc.
- A partir de lo obtenido en el primer punto, estudio y familiarización con el comportamiento típico de los materiales compuestos y con la forma de caracterizarlos y tratarlos para su simulación mediante programas informáticos. También se seleccionarán los casos empíricos que se acabarán reproduciendo con el software.
- Una vez se comprenda teóricamente el comportamiento que los materiales compuestos tienen. Familiarización con el software que se empleará para simular el comportamiento de los materiales seleccionados.
- Elaboración de los primeros casos prácticos utilizando el software. De esta forma comprobar que se están obteniendo los conocimientos teóricos y técnicos necesarios para la simulación final.
- Elaboración de los casos de estudio seleccionados empleando el software. Primero el objetivo será simular el comportamiento del rango lineal del material. Una vez superado el primer objetivo, se procederá a simular el comportamiento del rango no-lineal del material.
- Obtención, recopilación y validación de los resultados facilitados por el software.
- Presentación de conclusiones generadas a partir de lo observado en los resultados obtenidos.



## Capítulo 2. Introducción a los laminados en el ámbito naval

En este capítulo se expondrán brevemente cuales han sido en el transcurso de la historia de la construcción naval los materiales compuestos empleados, así como una visión actual del uso de estos y una previsión de futuro indicando hacia qué rumbo se está dirigiendo la aplicación de dichos materiales en nuestra industria para la construcción de nuevas embarcaciones o artefactos navales.

### 2.1 Historia

Centrándonos solamente en la propia definición de material compuesto, encontramos ciertos materiales cuya aplicación se remonta a las primeras embarcaciones construidas por la humanidad. Los primeros materiales compuestos de los cuales se tiene constancia de su uso fueron el adobe y la madera. El adobe tenía su principal aplicación en la construcción de viviendas. Este material revolucionó los métodos empleados hasta entonces para la edificación, abriendo una brecha hacia las técnicas de cimentación que hoy en día se utilizan. Por otro lado, se conoce que la madera fue empleada para construir las primeras embarcaciones creadas por el hombre. Por ejemplo, en la era de los egipcios, estos ya retrataban en las pinturas de las paredes de sus templos la construcción de navíos de madera a vela y con remos, que empleaban para el transporte fluvial de mercancías. Este material compuesto combina fibras de celulosa con lignina como matriz y tiene unas características notables para los requerimientos que se solicitaban en su época. A mitades del siglo XVIII, con la llegada de la revolución industrial, empezaron a sustituirse las construcciones de madera por las de acero. Un gran paso tecnológico que permitió construir buques de mayor tamaño y con propiedades mucho más resistentes. Su desventaja era que las estructuras eran mucho más pesadas y además se tuvo que introducir en la ecuación la problemática del óxido en los metales. Pese a esto, el metal sustituyó a la madera rápidamente, para la construcción de embarcaciones de mediana y/o gran eslora. En cambio, las embarcaciones pequeñas de recreo y pesqueras, entre otras, seguían construyéndose en madera, aunque se empezase a investigar construcciones alternativas.

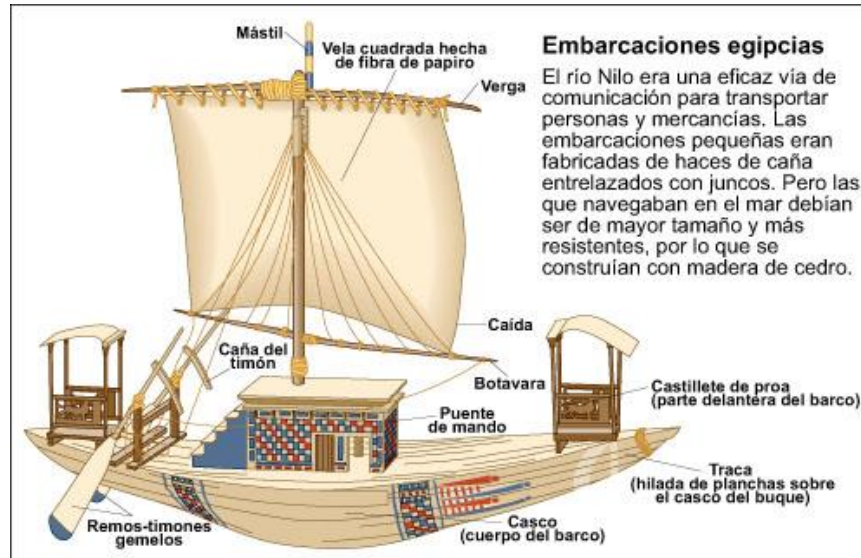


Figura 1 Embarcación egipcia construida en materiales compuestos – Fuente [3]

Los materiales compuestos tal y como los conocemos hoy en día aparecieron hace relativamente poco tiempo. Según [4], las primeras técnicas propiamente de moldeo de plástico, fueron desarrolladas por los nativos malayos a principios del siglo XIX. Empleaban una especie de goma elástica de origen vegetal llamada *gutta percha* para elaborar sus herramientas. También se conoce que el primer plástico de origen sintético fue la celulosa. Ésta fue producida a mediados de la revolución industrial y consistía en una disolución de productos celulósicos en ácido nítrico o sulfúrico. Pese a esto, la celulosa no revolucionó el mercado industrial ya que ésta no podía ser moldeada. Fue a partir de los inicios del siglo XX cuando, gracias al empleo de la “goma laca” y los plásticos de moldeo en frío, se acabó descubriendo la resina de fenol-formaldehído (resina fenólica), considerada el primer material sintético, moldeable y plástico. A partir de la incorporación de ésta, se empezaron a investigar nuevos materiales y se desarrollaron más de 50 familias distintas con miles de variaciones posibles.

## 2.2 Actualidad

Debido a los problemas que la construcción en madera o en acero implicaba y, gracias al continuo progreso, investigación y desarrollo de la tecnología durante años. A partir de mediados del siglo XX, finales de la segunda guerra mundial, hasta día de hoy, el uso de los materiales compuestos ha ido incrementándose continuamente. Se han diseñado nuevos materiales compuestos que tienen propiedades similares a las que poseen los metales, pero exentas de los problemas de coste, peso y poca resistencia a la corrosión. De este modo, se busca la posibilidad de fabricar embarcaciones más ligeras y duraderas y que, a la vez, permitan la reducción de su coste de producción.

La principal aplicación de los materiales que se han ido desarrollando ha sido en embarcaciones de pequeña y mediana eslora, la mayoría pertenecientes inicialmente al sector militar y, seguidamente, a la competición y al sector de la náutica de recreo. En la actualidad, prácticamente la totalidad de las embarcaciones de recreo y de competición se construyen a base de *composites*. Con esto se ha logrado sistematizar y simplificar los métodos de construcción, permitiendo la producción en serie a la vez que reducían aún más los costes. También se ha suprimido el problema de la corrosión, se ha reducido considerablemente el desgaste material y otros problemas que se daban con el acero y la madera al relacionarse con el medio marino.



**Figura 2. Embarcación de recreo de mediana eslora fabricada en composites – Fuente [5]**

En la alta competición, se ha logrado construir auténticos bólidos de carreras reduciendo sustancialmente su peso. Gracias a esto, junto con los avances en cuanto al estudio de los aspectos hidro-aero-dinámicos, se rompen periódicamente récords de velocidad en todas las categorías. Hoy en día, se ha logrado completar la vuelta al mundo en tan solo 40 días. Por otro lado, en la industria militar también se emplean los materiales compuestos. Por ejemplo, en las embarcaciones de gran eslora para construir determinadas super-estructuras que no precisan que sean construidas en acero. Así reducen el peso total del buque y, por ende, el desplazamiento, reduciendo la resistencia al avance y construyendo buques más rápidos y maniobrables. También existen construcciones de cascos íntegros en *composites*, debido a las solicitudes técnicas del trabajo que va a realizar la embarcación en cuestión. Como los dragaminas, que necesitan reducir el magnetismo producido por sus cascos de acero para ganar inmunidad a la detección de los radares. Pero dichas construcciones se realizan siempre con esloras más reducidas (hasta 70 metros). Por último, en el sector *Off-shore*, encontramos aplicaciones de materiales compuestos dentro de la rama de las energías renovables y también en el *Oil & Gas*.



Las plataformas siguen construyéndose con su infraestructura prácticamente en acero, pero se empieza a incorporar distintos componentes fabricados en *composites* tales como paneles estructurales, depósitos, tuberías, etc. con el fin de reducir también costes, mantenimiento y peso, a la vez que se mejora la estabilidad de la estructura. Los perfiles alares de los aerogeneradores marinos están fabricados íntegramente con materiales compuestos. Es un sector en desarrollo, por lo que aún queda mucho por indagar. De todas formas, ya se empieza a construir en materiales compuestos incluso las bases que soportan el generador y que lo sujetan de alguna forma al suelo marino.

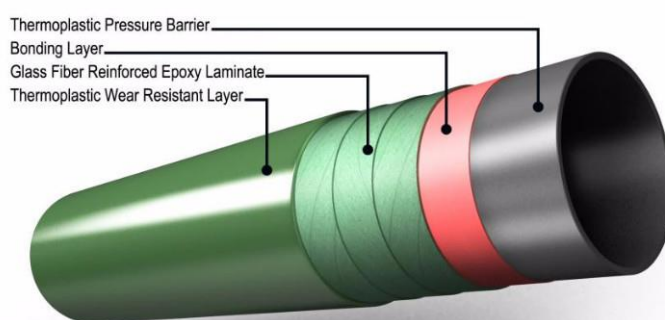


Figura 3. Detalle composición en materiales compuestos de *riser* utilizado en la industria *Off-shore*. (Reducen el peso que aumentaría al aumentar el espesor solicitado para alcanzar mayores profundidades) – Fuente [6]

## 2.3 Futuro

Es cierto que desde sus inicios hasta hoy en día los materiales compuestos han ido incorporándose tímidamente en aplicaciones industriales y que hace pocos años solo se hablaba de ellos en la industria aeronáutica. No obstante, se está observando un incremento en la aplicación de éstos en un amplio rango de sectores como el automotriz o el aeronáutico y, también, en la industria naval. Como se ha expuesto en el punto anterior, estos materiales son ampliamente utilizados en la actualidad para ciertas ramas del ámbito naval, dando mejores resultados que los cascos de metal o madera y, cada vez se estudian más aplicaciones posibles en las que incorporarlos. Los fabricantes continúan investigando año tras año, explorando nuevos límites y fronteras para los materiales compuestos. Están produciendo nuevos productos “a la carta” con distintas propiedades, según se requiera, que posibilitan su empleo en aplicaciones muy dispares. Según el Instituto Español de Tecnología (IXTITUTE) en [7], se confirma que el uso de materiales



compuestos está en auge. En los próximos años, se prevé un incremento de casi el 50 %, respecto a inicios del año 2000, en cuanto a la utilización de los *composites* solamente en la industria aeronáutica. A esto hay que añadir el resto de industrias, entre ellas la industria naval, que están apostando por el uso de dichos materiales para sus nuevas construcciones.

Todo esto es posible debido a las características especiales que los materiales compuestos poseen como:

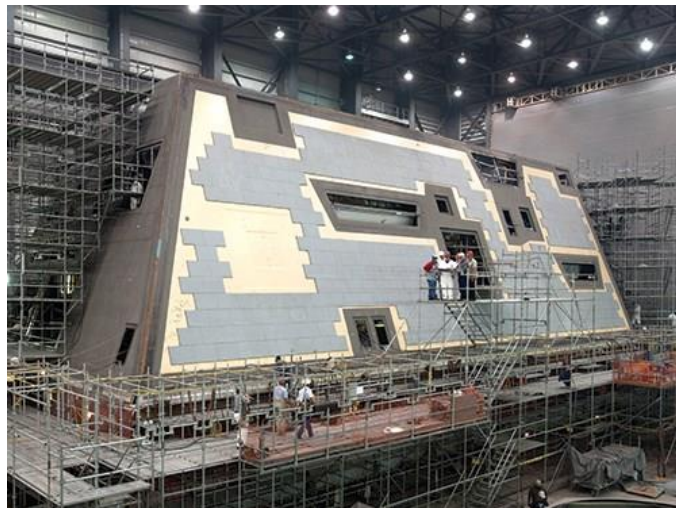
- Elevada relación resistencia-peso y rigidez-peso: Se necesita menos peso para obtener las mismas propiedades que poseen los materiales tradicionales.
- Gran resistencia a la corrosión y a los agentes químicos: Obteniendo una reducción de los costes de mantenimiento.
- Gran estabilidad térmica.
- Adaptabilidad de formas en el proceso de construcción: Facilita la confección de los cascos y piezas, reduciendo también los costes.
- No se han registrado importantes problemas debidos a fatiga.
- Elevada inflamabilidad, pero elevado índice de insolación: El fuego no penetra excesivamente, por lo tanto, se reducen las temperaturas en los compartimentos adyacentes al incendio.
- Otras propiedades positivas para aplicaciones determinadas como, por ejemplo, el factor de no ser unos materiales magnéticos.

Si analizamos su aplicación según el tipo de buque al que va destinada, hay campos en los que todavía no resulta interesante el cambio a la fabricación con materiales compuestos. Por ejemplo, para los buques mercantes que navegan a bajas velocidades no resulta especialmente necesario una reducción del peso de su estructura y los armadores prefieren lidiar con los problemas de la corrosión que invertir recursos en nuevas tecnologías mucho más caras por el momento.

Por otro lado, los buques proyectados para navegar a velocidades más elevadas como embarcaciones rápidas de rescate, recreo, competición, ferris, corvetas militares, etc; cada vez tenderán a construirse con un porcentaje mayor de compuestos, si no en su totalidad, debido a las admirables propiedades comentadas anteriormente. De igual manera, hay un enorme mercado en auge en el sector del *Off-shore* y las energías renovables marinas que poco a poco, a medida que la tecnología vaya avanzando, introducirá cada vez más los *composites* en su abanico de materiales de construcción. El trabajo debe focalizarse en la investigación y experimentación, tanto con los materiales ya fabricados como con los venideros que aún están en desarrollo o todavía sin descubrir. Todavía resta mucho por hacer, se debe definir y caracterizar las propiedades mecánicas y físicas de cada material, con el fin de suministrar a los ingenieros y diseñadores los recursos necesarios para que tengan conocimientos y experiencia suficientes para tomar decisiones profesionales en cuanto a estos nuevos tipos de materiales.

Los principales objetivos a cumplir en un futuro deben ser:

- La definición de unos estándares y una normativa global que regule todos los aspectos necesarios de control y seguridad en lo referente a los materiales compuestos dentro de la industria naval. Ya que los métodos de ensayo y estándares actuales son específicos para la industria aeronáutica.
- Mejorar la seguridad en el empleo de los *composites* en el ámbito marítimo.
- Solucionar la actual dificultad para la predicción del comportamiento de este tipo de materiales debido a la falta de modelos que lo simulen. Una buena manera de solucionar este obstáculo sería invirtiendo en investigación y desarrollo de nuevos modelos analíticos para su aplicación en este campo.
- Seguir mejorando todas las propiedades de los *composites* con el desarrollo de nuevos productos que solucionen ciertos problemas existentes en la actualidad como la osmosis, la baja resistencia al fuego, la resistencia a agentes químicos, la delaminación, etc.
- Realizar más ensayos para predecir la respuesta de los materiales en condiciones de servicio.
- Y, por último, tal como se explica en [7], estos materiales traen consigo la necesidad de un cambio en las competencias de los ingenieros que trabajan con ellos en cualquier punto del proceso. Se debe formar profesionales que tengan conocimientos de los elementos, para poder tener un mejor dominio y comprensión de estos nuevos tipos de materiales.



**Figura 4. Construcción íntegra en compuestos de la cubierta de mando y control del destructor de última generación de la Armada Estadounidense – Fuente [8]**

## Capítulo 3. Modelos utilizados para simular el comportamiento de materiales

Con el objetivo de simular el comportamiento real que tienen los materiales, se emplean tres tipos diferentes de modelos constitutivos que son capaces de predecir la forma en la que estos reaccionan y se comportan al someterlos a un esfuerzo determinado. Además de los modelos expuestos en este capítulo, cabe indicar que en la actualidad existen otros modelos constitutivos y que algunos de ellos son fruto de la combinación de los estudiados. En el siguiente capítulo se expone una breve explicación de los tres modelos utilizados para el estudio del comportamiento de los materiales.

### 3.1 Elasticidad

Los materiales que describen un comportamiento elástico son aquellos en que la relación tensión-deformación es lineal y elástica. Por lo tanto, la tensión es proporcional a la deformación y, al descargar, no aparecen tensiones residuales, deformaciones permanentes o pérdida de rigidez. Es por esto por lo que los materiales que siguen dicho comportamiento conservan su rigidez incluso superando su límite elástico. La ecuación constitutiva que describe dicho comportamiento es la siguiente:

- En una dimensión determina:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Donde  $\sigma$  hace referencia a la tensión aplicada,  $E$  al módulo de *Young* del material y  $\varepsilon$  a la deformación sufrida.

- En notación tensorial:

$$\sigma = \mathcal{C} : \varepsilon \quad (2)$$

Donde  $\sigma$  hace referencia a la tensión aplicada,  $C$  a la matriz constitutiva elástica del material y  $\varepsilon$  a la deformación sufrida.



Figura 5. Diagrama tensión/deformación para modelo elástico - Fuente propia

Cabe indicar que no existen materiales completamente elásticos ya que siempre van a sufrir una pequeña deformación como mínimo, que originará una pérdida de linealidad en la curva de su comportamiento. Pese a esto, se puede considerar elástico cualquier material siempre y cuando no se supere el límite elástico de éste. En el mundo de los materiales compuestos, las fibras que lo conforman pueden ser consideradas normalmente como elásticas puesto que su comportamiento es cuasi en su totalidad lineal hasta alcanzar su límite de rotura.

### 3.2 Plasticidad

El comportamiento plástico viene definido por aquellos materiales que al sufrir una carga de tensión que supere el valor de su límite elástico y descargar, se originan deformaciones permanentes en el material, pero sin verse reducida la rigidez propia de éste.

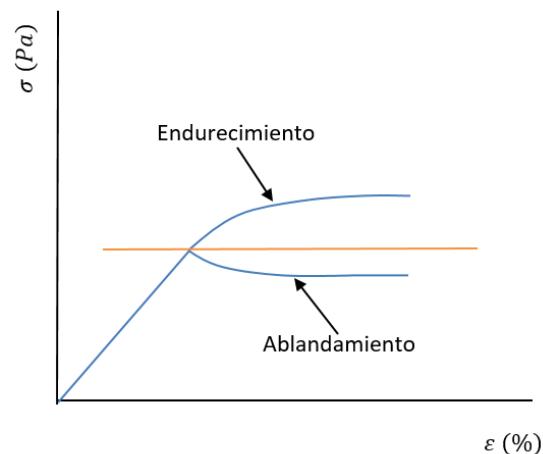
La fórmula que describe dicho comportamiento está determinada por la Ley constitutiva plástica:

- En una dimensión:

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (3)$$

Donde  $\sigma$  hace referencia a la tensión aplicada,  $E$  al módulo de *Young* del material,  $\varepsilon$  a la deformación sufrida y  $\varepsilon_p$  a la deformación plástica, que es la parte de deformación sufrida irreversible.

Una vez alcanzado el límite elástico, el comportamiento del material puede seguir leyes de endurecimiento o ablandamiento, o una mezcla de ambas, como se puede ver en la *figura 6*. Además, estas leyes pueden ser lineales, exponenciales o una combinación de ambas. Si el material sigue la ley de endurecimiento, al aplicar una mayor deformación, el valor de la tensión también crece. En cambio, si sigue la ley de ablandamiento, al aumentar la deformación el valor de la tensión disminuye. Hay materiales, como por ejemplo el acero, que muestran un comportamiento mixto de endurecimiento y ablandamiento.



**Figura 6. Diagrama tensión/deformación. Diferencia endurecimiento vs ablandamiento - Fuente propia**

- En notación tensorial

$$\sigma = C : (\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (4)$$

Donde  $\sigma$  hace referencia a la tensión aplicada,  $C$  a la matriz constitutiva elástica del material,  $\varepsilon$  a la deformación sufrida y  $\varepsilon_p$  a la deformación plástica, que es la parte de deformación sufrida irreversible.

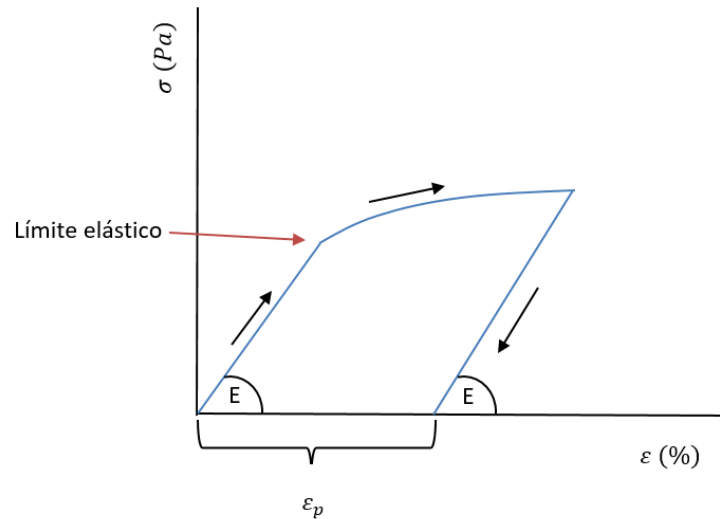


Figura 7. Diagrama tensión/deformación para modelo plástico - Fuente propia

Un ejemplo de materiales que suelen cumplir la ley expuesta son los metales. Asimismo, encontramos clasificados como tales el látex, el polietileno, el caucho, el poliéster, etc.

### 3.3 Daño

Los materiales que describen un comportamiento de daño se caracterizan por que al aplicar una tensión sobre ellos tal que llega a su límite elástico y lo sobrepasa, al descargar la tensión aplicada éstos quedan dañados. Es decir, al descargarlos no sufren una deformación permanente, pero su rigidez se verá reducida fruto de la aparición de microgrietas en el material.

La fórmula matemática que describe dicho comportamiento viene definida por:

- En una dimensión:

$$\sigma = E^d \cdot \varepsilon ;$$

$$E^d = (1 - d) \cdot E_o ; \quad (5)$$

Sustituyendo  $E^d$  en la primera ecuación obtenemos:

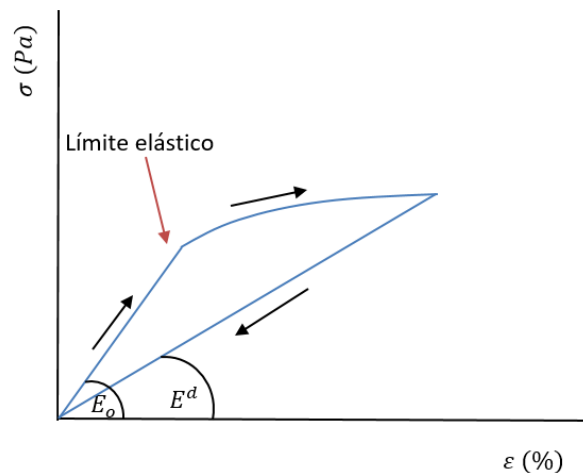
$$\sigma = (1 - d) \cdot E_o \cdot \varepsilon$$

Donde  $d$  es el daño sufrido por el material medido en tanto por uno,  $E_o$  es el módulo de *Young* inicial del material,  $E^d$  es el módulo de *Young* del material resultante al descargar y  $\varepsilon$  representa la deformación sufrida.

- En notación tensorial:

$$\sigma = (1 - d) \cdot C : \varepsilon \quad (6)$$

Donde  $d$  es el daño sufrido por el material medido en tanto por uno,  $C$  es la matriz constitutiva elástica del material y  $\varepsilon$  representa la deformación sufrida.



**Figura 8. Diagrama tensión/deformación para modelo daño - Fuente propia**

Como ejemplos de casos en los que un material se comporte siguiendo dicho modelo podemos mencionar la simulación de un material compuesto por fibras y matriz donde, tras romperse algunas fibras al estar sometido a un esfuerzo, el material pierde parte de su rigidez. Otro caso común en el que podemos observar este comportamiento es el que presenta el hormigón armado.





## Capítulo 4. Caracterización de los materiales compuestos

El siguiente capítulo está dividido en dos apartados. En el primero se presenta una breve reseña sobre la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo, que es empleada para predecir el comportamiento de los materiales compuestos a partir de programas informáticos de cálculo por elementos finitos como el que se va a utilizar en capítulos posteriores. En el segundo apartado se caracterizan los diferentes materiales presentes en la referencia de donde se ha obtenido los datos de los ensayos que posteriormente se intentarán reproducir mediante el software.

### 4.1 Comportamiento de los materiales compuestos: Teoría de Mezclas Serie/Paralelo

En la actualidad, existen diferentes formulaciones para caracterizar el comportamiento de los materiales compuestos. Seguramente, la teoría más ampliamente utilizada sea la Teoría Clásica de Laminados. De tal manera, la gran mayoría de modelos obtienen las propiedades del compuesto a partir de las propiedades del laminado, que se obtienen gracias a ensayos experimentales. También se adquieren empíricamente las propiedades elásticas del compuesto y el propio fallo de éste, entendiéndose como tal la aparición de grietas en la matriz, la delaminación o la rotura de fibras. No obstante, en el presente trabajo se utiliza una formulación diferente capaz de obtener el comportamiento del compuesto, independientemente de su secuencia y de la orientación y participación de sus materiales constituyentes, a partir del comportamiento de fibra y matriz. Esta formulación es la presentada en la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo, la cual se presentará a lo largo de este capítulo.

La Teoría de Mezclas Serie/Paralelo es un gestor de ecuaciones constitutivas que nos facilita, en última instancia, los datos necesarios para conocer el comportamiento mecánico del material compuesto a estudiar. Esto se logra partiendo de los componentes que forman el material compuesto, es decir, se centra en el estudio del material según las características que tiene cada laminado dentro del compuesto y que, a su vez, son determinadas según las características de la fibra y la matriz que los constituyen. Esta forma de tratar el compuesto es la que hace que la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo sea ventajosa frente a otras ya que permite

captar el nuevo comportamiento del compuesto en caso de variar las características de los materiales constitutivos que lo forman, como: Tipo de fibra o matriz, participación en el compuesto, orientación, secuencia, etc.

Previamente a exponer las premisas que presenta la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo, deben exponerse las Teorías de Mezclas Clásicas que sentaron las bases de las hipótesis actuales.

1. Modelo clásico: lo forman la teoría de mezclas clásica y, a su vez, la teoría de mezclas inversa, que realizan un tratamiento a macroescala del compuesto basado en la mecánica de los medios continuos.

Ambas teorías comparten parte de sus suposiciones, que son las siguientes:

- Cada volumen infinitesimal que constituye el compuesto contiene un número finito de materiales componentes.
- Cada componente contribuye proporcionalmente a su participación volumétrica en el compuesto.
- El volumen de los componentes es mucho más pequeño que el del compuesto.

Por último, una de las suposiciones varía según se hable de cada una de las teorías:

- Teoría de mezclas clásica: Existe iso-deformación en todos los componentes que forman el compuesto.
- Teoría de mezclas inversa: Existe iso-tensión en todos los componentes que forman el compuesto.

Tradicionalmente, la Teoría de Mezclas Clásica y la Teoría de Mezclas Inversa se han utilizado en exclusividad para la obtención de las propiedades mecánicas del laminado, pero no para obtener el comportamiento no-lineal del compuesto. Gracias al desarrollo de nuevas investigaciones sobre ello, con el trabajo de Fernando Rastellini [9] y [10], se trata la Teoría de Mezclas como un gestor de ecuaciones constitutivas, para obtener el comportamiento no-lineal del compuesto.

Entonces, a partir de la formulación clásica previamente indicada, se presentó la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo desarrollada por Fernando Rastellini en [9] y [10].

2. Modelo Serie/Paralelo: Con este modelo se mejora todo lo explicado anteriormente formulando una hipótesis que toma las relaciones entre deformación y tensión de los materiales componentes de forma más realística.

Para ello:

- Se determina una condición de iso-deformación en la dirección paralela a la que tiene la fibra del compuesto. Dirección en paralelo.

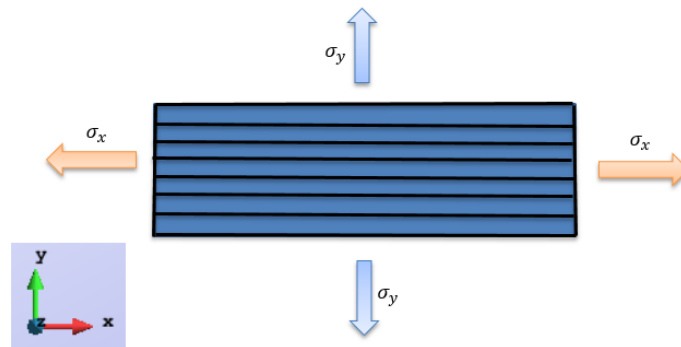
- Se determina una condición de iso-tensión en la dirección perpendicular a la que tiene la fibra. Dirección en serie.

Las hipótesis en las que se basa esta teoría son las expuestas seguidamente:

- Los componentes del material se someten a la misma deformación en la dirección de la fibra, es decir, en paralelo.
- Los componentes del material se someten a la misma tensión en la dirección perpendicular a la fibra, es decir, en serie.
- La respuesta del compuesto se ve directamente relacionada con las participaciones volumétricas de cada componente del material.
- Las fases del compuesto se distribuyen de forma homogénea.
- Se considera que los componentes están unidos perfectamente entre ellos mismos.

Ésta será la formulación que se empleará posteriormente en el software de elementos finitos *RamSeries* de *Compass* utilizado para simular el comportamiento mecánico de los materiales compuestos que se presentarán.

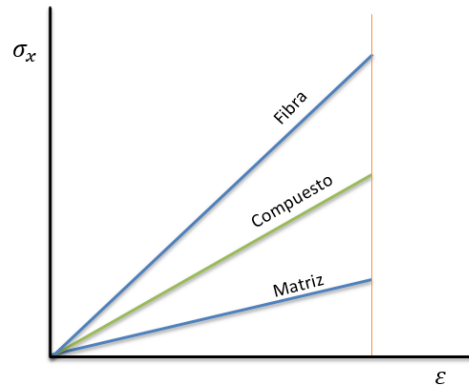
A continuación, se presenta un conjunto de figuras explicativas para poder entender mejor las hipótesis de la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo.



**Figura 9. Laminado con fibras en la dirección longitudinal (eje X) - Fuente propia**

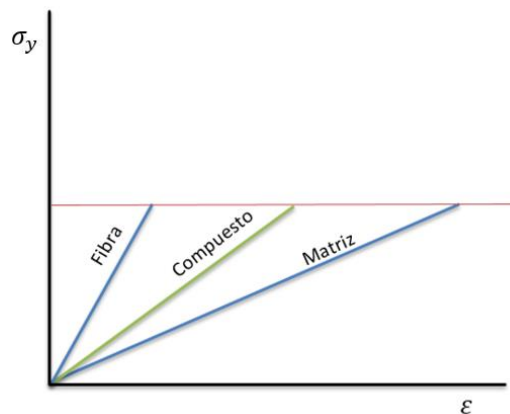
La *figura 9* muestra un material compuesto formado por un conjunto de fibras y una matriz. Las fibras están dispuestas longitudinalmente en la pieza y la matriz es la encargada de conformar la pieza en sí, dándole uniformidad a la forma rectangular que tiene y la solidez al material. Como se puede observar, las fibras siguen la dirección de la tensión  $\sigma_x$ , mientras que  $\sigma_y$  es la tensión aplicada en dirección perpendicular a las fibras. Por lo tanto,  $\sigma_x$  será en este caso la tensión de los componentes que trabajan en paralelo y  $\sigma_y$  la de los que trabajan en serie.

A continuación, las *figuras 10 y 11* muestran los diagramas resultantes en esta situación para las distintas direcciones de tensión.



**Figura 10. Diagrama tensión/deformación en la dirección de  $\sigma_x$ . En paralelo - Fuente propia**

Observamos que, efectivamente, en la dirección paralela a las fibras, dirección en la que se aplica la tensión  $\sigma_x$ , se impone una condición de iso-deformación. Los módulos de *Young* de cada componente por separado son distintos, pero la deformación de estos alcanza en los tres casos el mismo valor. Nótese que la tensión del compuesto es la suma del producto de las tensiones por la participación volumétrica de cada material.



**Figura 11. Diagrama tensión/deformación en la dirección  $\sigma_y$ . En serie - Fuente propia**

Por otro lado, en la dirección perpendicular a las fibras, al aplicar  $\sigma_y$ , tanto los componentes como el compuesto muestran un comportamiento en serie, que implica una condición de iso-tensión. Como se observa, la fibra, la matriz y el compuesto también tienen módulos de *Young* diferentes. Pero en este caso alcanzan distintas deformaciones, manteniendo el valor de su

tensión máxima igual entre sí. Nótese que la deformación en el compuesto es la suma del producto de las deformaciones por participación volumétrica de cada material.

## 4.2 Caracterización de los materiales constitutivos

Los casos estudiados en este trabajo para posteriormente caracterizar su comportamiento se han obtenido gracias a la fuente [11], donde se presentan datos facilitados de diferentes ensayos a tracción a determinados materiales compuestos. Los materiales que se exponen están formados por diferentes materiales constitutivos. A continuación, van a presentarse los distintos materiales estudiados junto con sus propiedades características, diferenciando la fibra de la matriz.

### Caracterización de las fibras:

Para llevar a cabo el ensayo, se realizaron cuatro configuraciones diferentes de material compuesto. Los materiales empleados para su conformación son los mismos en las cuatro configuraciones, el factor diferenciador entre ellos es la orientación de las fibras en los laminados de los compuestos. Las fibras utilizadas para la fabricación de las probetas de ensayo son del tipo fibra de vidrio *Eglass*. Según [12], la fibra de vidrio está formada por numerosos y muy finos filamentos poliméricos que suelen fabricarse a base de Silicio. La denominada como tipo *E-glass* es la más comúnmente utilizada y está formada por aluminio-borosilicato con menos de un 1 % en peso de óxidos alcalinos. Este tipo de fibras tiene una rigidez menor respecto a otros tipos, como por ejemplo la fibra de Carbono, pero resulta más económica, tiene mayor resistencia a quebrarse y es mejor aislante térmica. Cabe indicar que las propiedades mecánicas de la fibra, presentadas en la tabla 1 de la *figura 15*, fueron obtenidas de forma indirecta a través de múltiples ensayos de láminas. También debe destacarse la dificultad de obtención de las propiedades de las fibras ensayándolas separadas de una matriz, es decir, ensayando solo una fibra o conjunto de ellas. Esto es debido a los pequeños diámetros que las fibras tienen, que hacen que sujetarlas de forma efectiva sea complicado y que las propiedades de las propias fibras que conforman el tejido puedan ser distintas de unas a otras, pese a ser del mismo tipo, modelo y fabricante. Es por esto por lo que se suelen obtener las propiedades de la fibra deseada a partir de ensayar un laminado conformado por la fibra y una matriz que actúa como fijador del tejido de fibras. A partir de los datos que se obtienen en el ensayo, se emplean relaciones micro-mecánicas para extraer las propiedades de la fibra. Sin embargo, se debe tener en cuenta la posibilidad de que existan variaciones en los valores finales obtenidos y que, por lo tanto, disten de los valores reales intrínsecos de la fibra.

### Caracterización de las matrices:

Asimismo, se selecciona un tipo de matriz para conformar las cuatro configuraciones de laminado ensayadas en el documento. La matriz es resina *epoxy* de tipo SR1500/SD2505. Se emplea *epoxy* debido a que este tipo de resina es ampliamente utilizado en aplicaciones

estructurales. Según [13], el *epoxy* es una resina polimérica termoestable que se caracteriza por endurecerse al mezclarse con cierta cantidad de un agente catalizador. Para ello, están fabricadas a base de epóxidos, normalmente bisfenol A. Es la resina más utilizada en materiales compuestos de alta calidad ya que posee mejores propiedades que las otras resinas empleadas para este fin, tanto físicas como mecánicas. Además, tiene una buena capacidad de adhesión que permite fabricar laminados con porcentajes en fibra elevados.

Las propiedades de la fibra y la resina empleadas están recogidas en las tablas 1,2 de la referencia [11], adjuntadas acto seguido en la *figura 12*.

**Table 1**  
Mechanical properties of Glass fiber.

Glass fiber properties				
Areal density	Tensile strength	Poisson's ratio	Strain to failure	Tensile modulus
300 g/m <sup>2</sup>	2500 MPa	0.25	4.8%	74 GPa

**Table 2**  
Mechanical properties of Epoxy resin.

Epoxy resin properties		
Young's Modulus	Tensile strength	Flexural strength
2900 MPa	74 MPa	310 MPa

**Figura 12.** Tablas 1 y 2 de la referencia [11]. Propiedades mecánicas de fibra y matriz

# Capítulo 5. Ensayos realizados a materiales compuestos

Antes de que existiesen programas informáticos capaces de predecir el comportamiento de los materiales compuestos, se empleaban solamente métodos empíricos para ensayar el comportamiento de los materiales y de esta forma obtener sus propiedades y saber cómo reaccionan frente a distintas condiciones aplicadas. En la actualidad los ensayos, además de ser necesarios para obtener las propiedades del material, son necesarios para caracterizar el comportamiento del material que se quiere simular en el software a través del estudio numérico de éste. Por lo tanto, sin la existencia de los ensayos empíricos a materiales no seríamos capaces de calibrar los modelos que se implementasen en el programa informático.

## 5.1 Introducción

La realización de todo tipo de ensayos que se llevan a cabo a los diferentes materiales compuestos que van desarrollándose actualmente, persigue dos objetivos principales: El control de la calidad de estos y, la determinación y validación de sus propiedades físico-mecánicas características para comprobar que cumplen con los objetivos de comportamiento marcados en cada caso.

Este proceso se precisa en la fabricación industrial de cualquier producto, independientemente del material con el que esté formado. No obstante, en la rama de los materiales compuestos, los ensayos resultan imprescindibles debido al gran abanico de combinaciones y compatibilidades fibra-matriz existentes, a la disparidad y, frecuentemente, complejidad de los procesos de fabricación de los materiales y, a la sensibilidad de dichos procesos a las condiciones ambientales de cada momento. Factores que pueden influir sustancial y negativamente en el acabado final del producto conformado. Por este motivo se requiere de una normativa específica que regule de manera estricta los procesos de fabricación del material, como todo lo referente a los métodos de ensayo de validación. Pese a esto, hay muchas empresas que siguen sus propias normativas internas. En los diferentes métodos de ensayo que se exponen en este capítulo se emplean como

referencia las normativas EN (europea) y ASTM (americana) [14] , ya que son las estudiadas en la referencia [15], documento en el cual se basan las explicaciones del presente capítulo.

Dicho esto, los ensayos que se realizan en la actualidad a los materiales compuestos pueden y deben efectuarse tanto en la materia prima, que luego acaba conformando el *composite*, como en el propio material ya finalizado. De esta forma, se puede determinar la siguiente lista a seguir en el proceso de confección de un material compuesto [15].

- Validar la fibra.
- Validar la matriz.
- Control de la reacción.
- Caracterizar el producto semi-acabado.
- Control de moldes y herramientas involucradas en el proceso.
- Control de proceso de fabricación y de los métodos de manipulación.
- Control del proceso de curado.
- Control de la pieza terminada (del *composite* en sí mismo).
- Documentación de todo el proceso para catalogarlo.

Debido al ámbito de estudio del presente trabajo, en los métodos explicados a continuación se focalizará solamente en la descripción de los ensayos que se realizan para la validación de la pieza una vez terminada. También debe informarse de la posibilidad de realizar dos tipos muy diferenciados de ensayos: los ensayos destructivos y los no destructivos. Ambos métodos son utilizados en la actualidad, aunque los destructivos son los mayormente aplicados. El motivo de esto es a causa de los elevados costes de adquisición de las máquinas necesarias para realizar ensayos no destructivos. Estos costes son mucho mayores que lo que puede llegar a costar conformar una probeta del material con el que se va a construir un producto determinado o extraerla directamente del producto y ensayarla. Por esta razón, las principales técnicas de validación que se estudiarán en este trabajo están dentro de los ensayos destructivos. No obstante, también se hará una breve referencia a los diferentes métodos no destructivos que se emplean.

Antes de empezar a explicar los diferentes métodos de ensayo que existen, se debe hacer especial mención al control de las probetas de ensayo. Las probetas, constituidas del material a ensayar, son las piezas que se utilizan para realizar el experimento. Éstas vienen reguladas por la normativa correspondiente que indica que deberán fabricarse de la forma más aproximada posible a como se fabrica el material a ensayar y deberán tener unas geometrías preestablecidas. En muchas ocasiones también es necesario estudiar el material en las condiciones reales de trabajo, no en las ideales de laboratorio. Para ello, existen métodos de acondicionamiento de la probeta. Se podrían destacar aquí dos métodos diferentes: Uno para acondicionar el material a las características que tendrá a largo plazo y otro para las que tendrá a corto plazo.



- Cuando se acondiciona a las características a largo plazo se hace referencia al envejecimiento.
- Cuando se acondiciona a las características a corto plazo se hace referencia a la oxidación.

## 5.2 Ensayos destructivos

### 5.2.1 Tracción

Existen diferentes tipos de ensayos a tracción, pero generalmente estos sirven para medir los siguientes parámetros:

- Módulos de *Young* en la dirección de la fibra y en la dirección paralela a ésta.
- Coeficiente de *Poisson*.
- Resistencias a tracción en la dirección de la fibra y en la dirección paralela a ésta.

Las probetas para este ensayo suelen ser de sección constante rectangular o cilíndrica con lengüetas en los extremos para poder amarrarlas.

Este tipo de ensayo consiste en aplicar una tensión uniaxial que va aumentando progresivamente a velocidad moderada mientras unos sensores miden la deformación que experimenta el material hasta su rotura. Suelen tener una duración desde unos segundos hasta minutos.

En estos ensayos se observa que prácticamente el 90 % del trabajo que se efectúa para deformar el material, se disipa en forma de calor [11]. Este hecho es especialmente delicado cuando se ensayan polímeros y materiales compuestos debido a su baja conductividad térmica. Factor que puede llegar a alterar las propiedades intrínsecas del material y anular los resultados del ensayo realizado. Por esta razón, las normativas indican que debe efectuarse el ensayo aplicando la tensión a velocidad constante.

Al iniciar el ensayo, la máquina empieza a aplicar fuerza a la probeta. Ésta, fijada en la máquina por medio de sus lengüetas, tiene unas dimensiones predeterminadas y está fabricada del mismo material a ensayar. La fuerza se va incrementando gradualmente provocando que la probeta se alargue a medida que aumenta la tensión aplicada sobre ella hasta que rompe. Al finalizar el ensayo la máquina genera un diagrama tensión–deformación para que se pueda observar gráfica y numéricamente el comportamiento seguido por el material. La medición de estas variables se realiza generalmente mediante galgas extensiométricas colocadas en la propia probeta.



Figura 13. Detalle de un ensayo de tracción a una probeta de composite - Fuente [16]

### 5.2.2 Compresión

Este tipo de ensayo se emplea en materiales compuestos para determinar:

- Sus constantes elásticas.
- Las resistencias a compresión.

Al caracterizarse por ser materiales muy anisotrópicos, el poder determinar la resistencia a compresión depende mucho del método que se emplee ya que si se aplica de forma incorrecta la carga provocará una rotura prematura por pandeo del material mucho antes de que éste rompa por el esfuerzo soportado a compresión. Es por ello por lo que existen diferentes métodos para ofrecer alternativas según el tipo de material y probeta que se vayan a utilizar. Algunos de los métodos más comúnmente utilizados son el método *Celanese* o el IITRI [15]. En estos tipos de ensayo se coloca la probeta entre dos mordazas de cuña de compresión para evitar su rotura prematura. De esta forma, la compresión se aplica sobre las placas en dirección longitudinal y las placas, a su vez, transmiten dicho esfuerzo a la probeta constituida del material a ensayar. Suelen emplearse estos métodos para laminados cruzados o a 90 grados, pero se trata de orientarlos siempre en la misma dirección de aplicación de la carga. Siendo la variación de esta alineación laminado-carga la que más influye en la producción de resultados erróneos por rotura prematura.

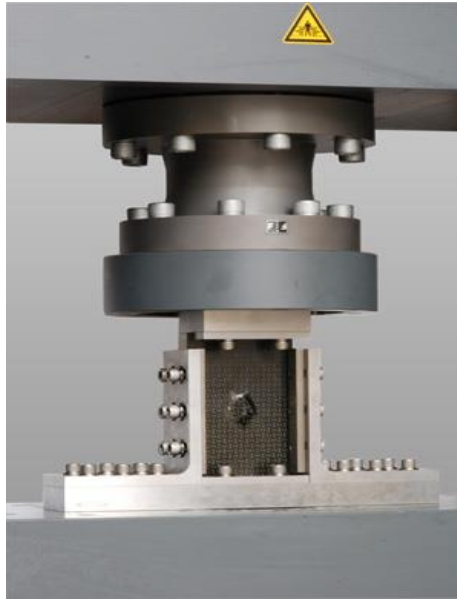


Figura 14. Ensayo a compresión de probeta dañada de material compuesto – Fuente [17]

### 5.2.3 Cortante

Este tipo de ensayo se emplea para determinar la resistencia del material compuesto a esfuerzos de cortadura plana. Existen varios tipos de ensayos, pero dos de los más representativos son los que ensayan probetas de laminados con fibras dispuestas a  $\pm 45^\circ$  y el ensayo *Iopescu*.

En el primer caso, el ensayo se realiza siguiendo el mismo procedimiento que en el ensayo a tracción pura, pero las fibras formarán  $\pm 45^\circ$  respectivamente con la tensión de tracción a la que es sometida la pieza.

En el segundo caso, se disponen dos entallas dónde se producirá una tensión de cortadura al cargar la pieza. Los momentos flectores que se generan por las dos fuerzas opuestas que actúan contra la probeta son los encargados de crear la tensión de cortadura. Utilizando este método se genera la tensión requerida en la sección media de la probeta.

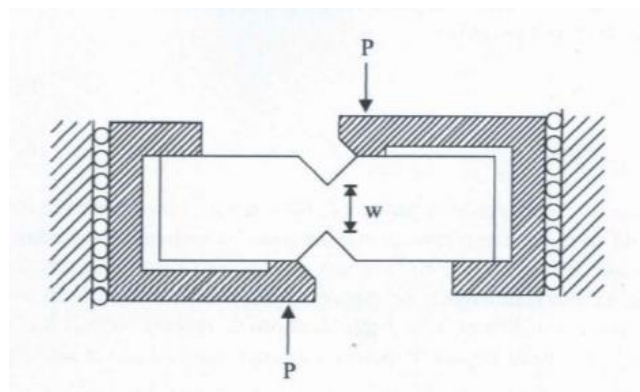


Figura 15. Esquema del ensayo *Iopescu* – Fuente [15]

### 5.2.4 Flexión

Son ensayos empleados para el control de la calidad del material y para la especificación de éste, pero no lo caracteriza. También puede emplearse para determinar resistencias de las fibras exteriores y el módulo de *Young* de compuestos homogéneos o poliméricos [15].

Existen varios métodos de ensayo, pero los más utilizados son los ensayos de flexión donde la probeta se apoya en 3 o 4 puntos.

- El ensayo a 3 puntos suele emplearse en materiales que rompen al alcanzar niveles de deflexión pequeños.
- El ensayo a 4 puntos se emplea en materiales que pueden alcanzar grandes valores de desplazamiento, pero nunca superiores al 10 %.

En ambos debe aplicarse carga en la probeta de ensayo hasta que se alcance la rotura por tracción/compresión o hasta que las fibras exteriores alcancen su máxima deformación.

Los apoyos suelen estar constituidos mediante bulones, el diámetro de los cuales también viene especificado en la normativa correspondiente.

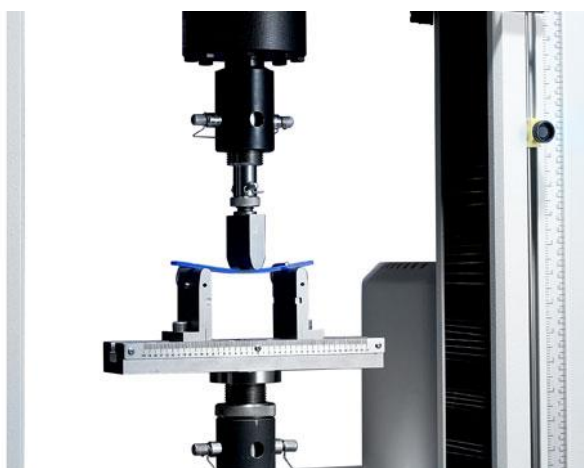


Figura 16. Ensayo de flexión a 3 puntos de material compuesto – Fuente [18]

### 5.2.5 Delaminación

Es una de las formas de rotura más común en los materiales compuestos. Se entiende como delaminación a la separación de dos capas del laminado que están dispuestas sucesivamente. Esta separación produce una pérdida de rigidez y resistencia en el compuesto que puede inducir al fallo de éste [19].

Para el análisis de la delaminación ocasionada en materiales compuestos se emplean técnicas basadas en la mecánica de fractura elástico lineal. Según [15], basándose en la teoría mecánica de fractura elástico lineal y aplicando los criterios de *Griffith* e *Irwin*, cito: “El crecimiento de la

delaminación se produce cuando la tasa de relajación de energía de deformación,  $G$ , supera un determinado valor crítico,  $G_c''$ . Este valor crítico es la tenacidad de fractura, de la cual existen realmente tres tipos según se apliquen las fuerzas para generar la delaminación como se muestra en la siguiente figura.

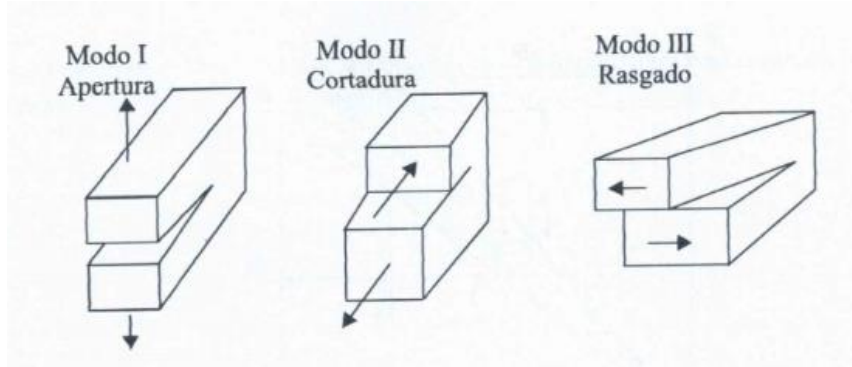


Figura 17. Diferentes formas de aplicar la fuerza para generar delaminación - Fuente [15]

Uno de los modos de fractura más interesantes de ensayar es el de cortadura, que se ensaya siguiendo el método ENF (*End Notched Flexure*). Éste consiste en un ensayo a flexión de 3 puntos de una probeta en la que ya existe delaminación inicial introducida mediante un inserto no adhesivo de cierto espesor.

### 5.3 Ensayos no destructivos

Debido a que cada vez se emplean más los materiales compuestos para la fabricación de productos, se ha ido incrementando la necesidad de métodos que determinen el estado y calidad del material sin la necesidad de destruir o afectar significativamente la pieza a ensayar. De esta manera, se ensaya el producto sin desmontajes o costes posteriores por recambio de piezas.

Este campo está muy desarrollado en el ámbito de los materiales homogéneos, tanto en la detección del defecto como en la puesta a punto de modelos de predicción del comportamiento del material que se quiere controlar. No obstante, en el campo de los materiales compuestos la situación se complica un poco, ya que un defecto detectado en una pieza fabricada con cierto material compuesto y con un uso determinado puede resultar ventajoso en otra pieza fabricada con el mismo material, pero destinada a un uso totalmente distinto. Por lo tanto, los END aplicados a *composites* deben realizarse desde otra perspectiva, observando y considerando los defectos de una forma totalmente distinta a como se lleva a cabo con el resto de materiales. Aun así, los defectos que se pueden localizar en este tipo de materiales son los efectuados en dos momentos clave: al fabricar el material, debido a el arduo proceso de conformación de éste y, al estar en servicio, debido a la exposición de la pieza a fatiga, por impactos ocasionados en ella, erosión, altas o bajas temperaturas sufridas,

humedad, ataque químico, etc. Algunos de los defectos que podemos encontrar en los materiales compuestos son: delaminación, contaminación del material por agentes externos, porcentaje en volumen de fibra o matriz inadecuado, falta de curado del compuesto, erosión, lixiviación, afloramiento de las fibras por falta de *gelcoat*, estrías, arrugamiento, agrietamientos, plastificación de la matriz, etc.

Como ejemplos de END aplicados en la industria de los materiales compuestos se pueden listar:

- Inspección visual.
- Inspección por Rayos X.
- Inspección por ultrasonidos.
- Termografía.
- Holografía.

A continuación, se explican brevemente algunos de estos ensayos no destructivos:

### 5.3.1 Inspección visual

Es un método un poco limitado en cuanto a la detección de distintas irregularidades o daños que presente el material, pero resulta muy económico y simple de realizar. Si el material es translúcido se podrá observar si existen poros, delaminaciones, agrietamiento de la resina o inclusiones apreciables a simple vista. Pero si el material no es translúcido solo se podrán apreciar daños superficiales en la pieza mediante el método de líquidos penetrantes.

### 5.3.2 Inspección por ultrasonidos

Este es por excelencia el ensayo no destructivo mayormente utilizado para la determinación de la calidad de un material compuesto. Para este tipo de inspección se emplean ondas ultrasónicas que se emiten a través del material gracias a un transmisor piezoeléctrico de comportamiento reversible y que emite con una frecuencia prefijada. Este transmisor convierte la electricidad que se le suministra en energía en forma de vibraciones que penetran y se transportan a través del material. Al haber un cambio en las propiedades acústicas del material se atenúa la onda acústica emitida y, al regresar de vuelta al receptor, éste lee dicha deformación y queda plasmada en un osciloscopio. Como indica la referencia [15], la atenuación se puede producir principalmente por tres situaciones: efectos viscoelásticos en la resina, dispersión geométrica por presencia de heterogeneidades en el laminado o por daños internos como delaminaciones o grietas.

Con este tipo de ensayo se pueden medir tanto discontinuidades superficiales como internas del material. Según el método utilizado, se puede incluso medir a qué profundidad se encuentra la irregularidad detectada.



### 5.3.3 Inspección por Termografía

En este método se aplica un flujo de calor uniforme al material a ensayar, el flujo de calor a través del material se ve alterado debido a los defectos que éste presente, mostrándose gradientes de temperatura en la superficie del material. Para llevar a cabo este ensayo se utiliza una cámara de infrarrojos que permite visualizar al momento y grabar para posterior análisis la distribución de temperaturas que presenta la pieza. Existen dos tipos de métodos a proceder:

- **Métodos estáticos:** donde se utilizan unos cristales líquidos colestéricos para impregnar toda la superficie del material a ensayar. Estos líquidos cambian de color en función de la temperatura que tienen, de esta forma muestran la distribución de temperaturas a lo largo de toda la pieza que se está ensayando.
- **Métodos dinámicos:** los más empleados son los *Stress-Generated-Thermal-Fields* y los *Externally-Applied-Thermal-Field*. En el primero, se aplican cargas cíclicas en la pieza a ensayar, elevándose de forma más pronunciada la temperatura en las zonas donde se encuentran los defectos. En el segundo, se aprovecha la distorsión que experimentan las isothermas en presencia de defectos para indicar que hay irregularidades en ciertas zonas.

La sensibilidad de dichos ensayos depende de la conductividad térmica del material y de cómo afecta el tipo de defecto que se quiere encontrar a esta propiedad. Debido a la baja conductividad térmica de los materiales compuestos, ésta técnica es muy adecuada para estos.

Por último, comentar que ésta técnica presenta gran utilidad para detectar daños por impacto, despegados de pieles en sándwich e imperfecciones en la fabricación del compuesto. Presenta la ventaja de no necesitar contacto con el material y del hecho de poder realizarse muchos ensayos en un tiempo reducido, permitiendo cubrir grandes superficies con un solo ensayo.



Figura 18. Detalle de ensayos por ultrasonidos (derecha) y por termografía (izquierda) – Fuente [17]





# Capítulo 6. Modelo propuesto para la simulación numérica de materiales compuestos

## 6.1 Datos del ensayo

### 6.1.1 Geometría de la probeta

La geometría escogida para el ensayo caso de estudio sigue los parámetros establecidos en la normativa ASTM D3039/D3039M según la referencia [11]. Aquí se describe de forma detallada la forma y medidas de la pieza de compuesto ensayada en laboratorio bajo estándares. Las medidas son las siguientes:

- Espesor: 2.3 mm
- Largo: 210 mm
- Ancho: 20 mm

La pieza tiene forma rectangular y adopta las medidas previamente mostradas. A continuación, se muestra una imagen descriptiva de ésta:

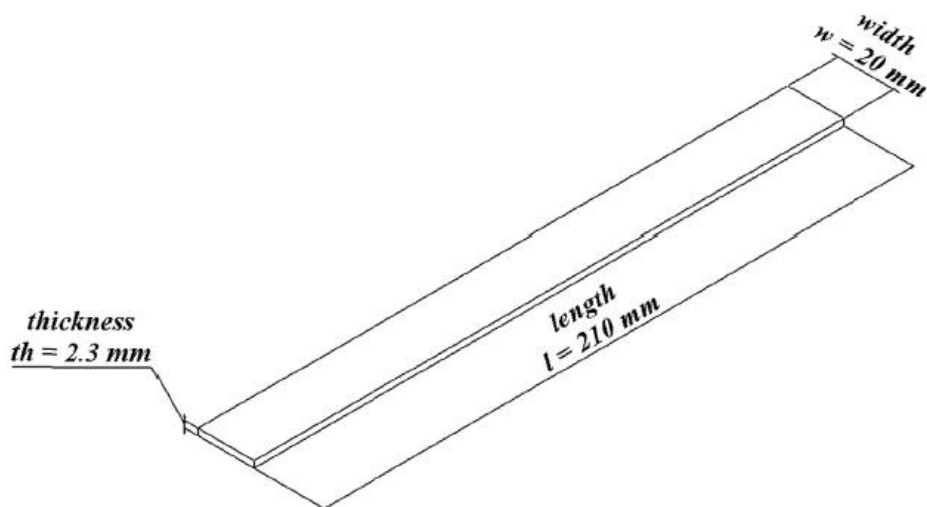


Figura 19. Imagen descriptiva de la geometría escogida - Fuente [11]

### 6.1.2 Configuración del laminado

En los ensayos de laboratorio se emplearon cuatro tipos diferentes de laminados en diferentes probetas. Todos los materiales ensayados estaban compuestos de laminados de ocho láminas de fibra de vidrio *Eglass* y resina *epoxy* SR1500/SD2505. La participación volumétrica de la fibra y la matriz en cada una de las láminas se determinó del 50 % en todos los casos, mientras que la participación volumétrica de cada lámina en el compuesto total varía según la disposición de éstas en cada caso. A continuación, se expone la configuración y espesor del ensayo escogido para modelizar el material:

- Laminado  $[90_2/0_2]_s$ : Este compuesto tiene las dos primeras y las dos últimas capas de laminado orientadas a noventa grados y las cuatro interiores orientadas a cero grados respecto a la dirección de aplicación de la tensión. El espesor de cada lamina es de 0.2875 mm y tanto las orientadas a cero grados como a noventa tienen una participación volumétrica en el compuesto del 50 %, es decir, 50 % de capas a cero grados y 50 % de capas a noventa grados.

Seguidamente se muestra una imagen descriptiva del laminado ensayado para comprender mejor su configuración.

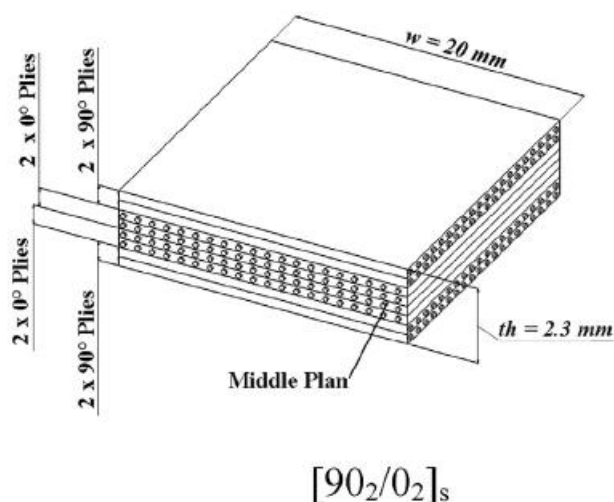


Figura 20. Configuración del laminado seleccionado para su simulación - Fuente [11]

### 6.1.3 Propiedades elásticas de los materiales constitutivos

Las principales propiedades elásticas de los materiales con los que se ha conformado el laminado a ensayar son el Módulo de *Young* y el Coeficiente de *Poisson* de cada elemento constitutivo, es decir, de matriz y fibra de cada laminado. Éstas son las únicas facilitadas en el informe del ensayo de laboratorio en la referencia [11] y son las siguientes:

<ul style="list-style-type: none"> <li>Matriz: Resina <i>epoxy</i> SR1500/SD2505</li> </ul>	Módulo <i>Young</i> : 3 GPa Coeficiente <i>Poisson</i> : 0.35
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fibra: Vidrio <i>Eglass</i></li> </ul>	Módulo <i>Young</i> : 74 GPa Coeficiente <i>Poisson</i> : 0.25

**Tabla 1. Propiedades de los materiales constitutivos del ensayo - Fuente [11]**

#### 6.1.4 Procedimiento y resultados presentados en el ensayo de referencia

Tal como indica [11]: “Para obtener los resultados finales, se ensayaron de tres a cinco probetas con la configuración de laminado pertinente para comprobar que los resultados eran válidos. El ensayo se realizó en laboratorio mediante una máquina de ensayos a tracción que alojaba una celda de carga de 100 Kn y avanzaba a una velocidad de deformación de 1 mm por minuto. Las tensiones y deformaciones originadas se medían a través de galgas extensiométricas de 50 mm”.

Los resultados obtenidos en el ensayo para la configuración de laminado que se quiere implementar después con el software son los que se muestran en la *figura 21*. El comportamiento que presenta el material y el proceso de fallo que ha seguido durante el ensayo no se describen en la referencia, pero interpretando la gráfica tensión/deformación se puede observar que inicialmente ésta presenta una primera zona lineal hasta entorno el 0.2 % – 0.3 % de deformación. Seguidamente la curva pasa al rango no-lineal, pese a que la variación de pendiente que se muestra es mínima. Este cambio de pendiente se estima que es debido a las micro-roturas que se generan dentro del material y a que las fibras más débiles empiezan a romperse, el echo va dándose a lo largo del ensayo hasta que las roturas van haciéndose cada vez mayores y las fibras que quedan sin romper deben soportar mayor tensión. Esto llega a provocar la delaminación de las capas que conforman el compuesto y finalmente la completa rotura de las fibras más resistentes, que seguían soportando la tensión.

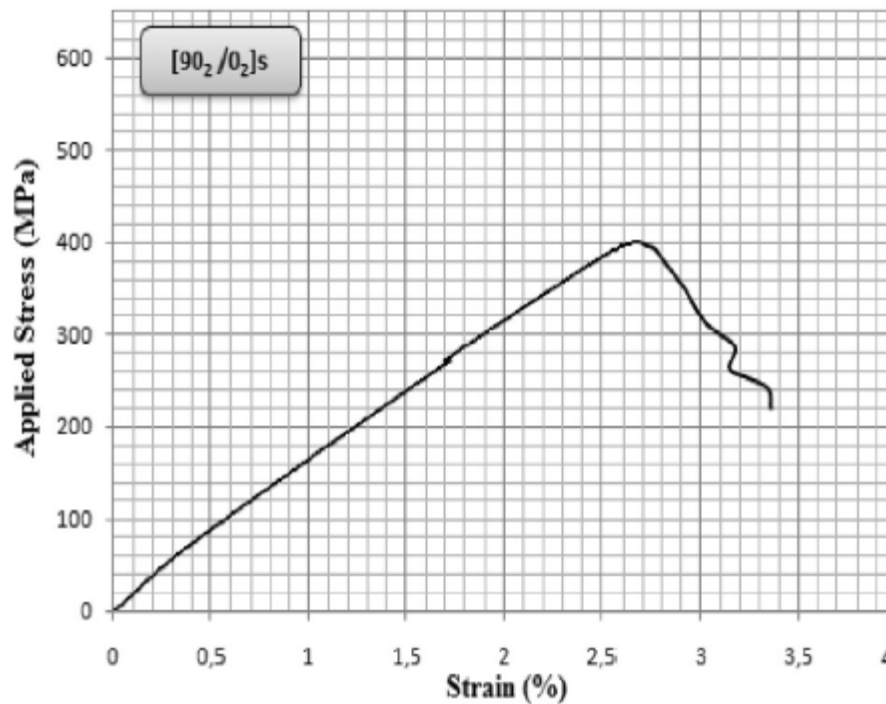


Figura 21. Curva tensión/deformación del ensayo – Fuente [11]

## 6.2 Datos para la simulación numérica

### 6.2.1 Configuraciones preliminares

Previamente a trabajar con *RamSeries*, existen una serie de parámetros a especificar justo en el momento que se abre la interfaz. Estos parámetros son los que caracterizan el tipo de problema o modelo que se quiere definir, la forma de calcular posteriormente con el software y el formato en el que se desea obtener los resultados posteriores al cálculo.

Al abrir *RamSeries*, aparece el menú *Start Data*. A continuación, se listan los diferentes elementos a activar dentro del menú:

- *Simulation dimension: 3D*
- *Structural analysis:*
  - *Element types: Solids*
  - *Analysis type: Incremental load analysis*
  - *Material constitutive model: Non-linear model*
  - *Geometric constitutive model: Linear geometry*
- También debe activarse el cálculo de compuestos no-lineales
- El resto de opciones se dejan por defecto.

También deben definirse los parámetros propios para el cálculo computacional que se requiere realizar por parte del software. Estos pueden editarse en los menús descritos a continuación y también en el archivo de datos que genera el programa.

- Dentro del menú de *“RamSeries”* > *“General Data”* > *“Non-Linear analysis data”* > *“General”*, el programa nos permite decidir el número máximo de iteraciones que se desea que realice en el cálculo de cada incremento. Para permitir que los cálculos converjan al resultado deseado se define el número máximo de iteraciones en 15.
- Dentro del menú de *“RamSeries”* > *“General Data”* > *“Incremental analysis data”* > *“Num. Increments”*, el programa permite definir el número de incrementos de cálculo que se desea hacer para el caso implementado. Debido a la escasez de tiempo y a las limitaciones técnicas del equipo empleado para ejecutar el software, se define un número de 100 incrementos. Estos son suficientes para lograr el objetivo que se desea, pese a que, si se aumentase el número de incrementos, se obtendrían resultados con mayor precisión.
- Dentro del menú de *“RamSeries”* > *“General Data”* > *“Results”* > *“Results file”*, definir el formato del archivo de resultados deseado como *“Binary1”*.

### 6.2.2 Definición de la geometría

- **Consideraciones:**
  - Para la simulación numérica, dado que el tamaño de la probeta asemeja a ésta a una lámina donde el espesor es mínimo comparado con su longitud, se asumirá que el material está homogeneizado. Es decir, se asume que la pieza está constituida por un único material, pese a que en la realidad la conforman 2 tipos de laminados distintos, que a su vez están formados por un total de 8 capas fibra-matriz.
  - Además, puesto que la deformación utilizada está implementada para elementos de tipo sólido, no para láminas, el modelo geométrico se simplificará para ahorrar coste computacional. Entonces, se estudiará únicamente el caso uniaxial, despreciando el resto de componentes. Para lograr este fin, el modelo se considerará iso-estático.

Las medidas de la geometría que deberá definirse en *Ramseries* se listan a continuación junto con una imagen del resultado final una vez generada en el software.

- Largo: 1 m
- Espesor: 1 m
- Ancho: 1 m

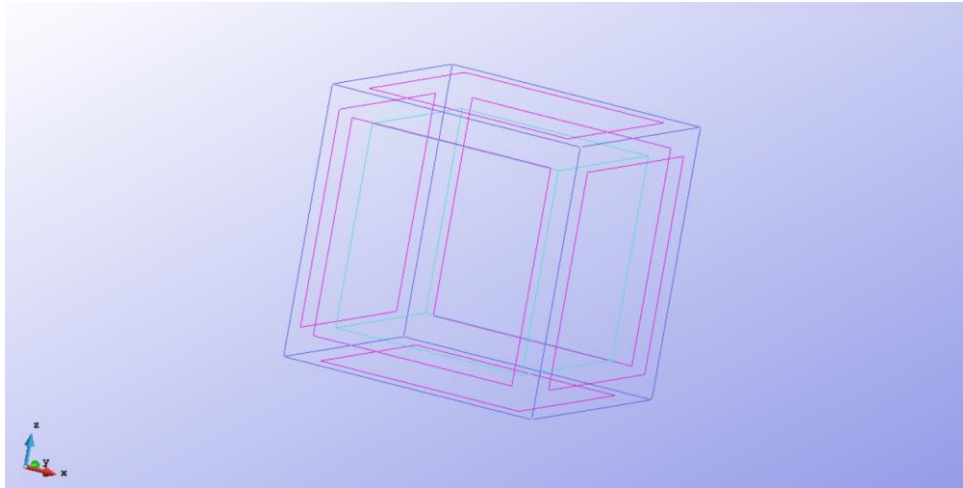


Figura 22. Geometría creada en el software - Fuente propia

### 6.2.3 Definición del laminado

Como ya se ha explicado en el apartado 6.1.2, la configuración que sigue el laminado del caso de estudio es la indicada como  $[90_2 / 0_2]_s$ , con una participación volumétrica de fibra y matriz de 50 % respectivamente. Pese a que en la realidad éste laminado esté conformado por dos capas exteriores a noventa grados, seguidas de cuatro capas a cero grados y por último otras dos capas a cero grados, el software no los considera de la misma forma distribuidos. Con la formulación que emplea el software para el cálculo, se considerará que solo hay dos tipos diferentes de laminados, uno a cero grados y otro a noventa grados y, como los dos laminados tienen el mismo número de capas (4 cada uno), tendrán la misma participación dentro del compuesto, que será del 50 % respectivamente. En la *figura 23* se muestra como aclaración la forma en que considera el programa al material compuesto que se quiere calcular.

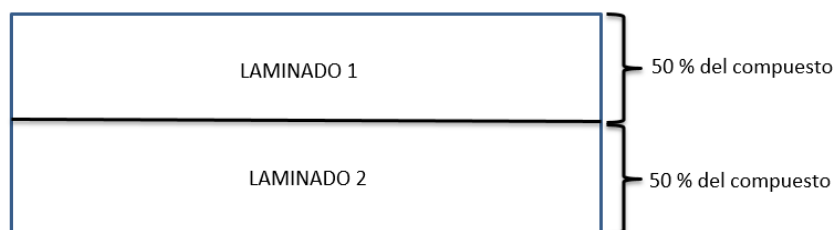


Figura 23. Consideración del compuesto según el software - Fuente propia

#### 6.2.4 Desplazamiento impuesto

Como se pudo observar en la *figura 21*, en los ensayos de laboratorio el valor del desplazamiento en el punto de máxima tensión de carga está entorno al 2.7 % de la longitud del modelo. Esta deformación se ve extendida hasta valores entre 3 % y 4 % de la longitud debido al comportamiento de ablandamiento que muestra el material antes de romper definitivamente. El valor de deformación con el que se quiera simular el ensayo, en este caso 3.4 %, deberá incorporarse en el modelo creado mediante una restricción. Como ya se ha indicado previamente, la longitud de la geometría creada tiene un valor de 1 metro. Por lo tanto, el valor de la deformación equivalente que sufre la probeta en su dirección longitudinal será el equivalente al 3.4 % de su longitud de 1 m. El valor resultante es de 0.034 m de desplazamiento equivalente. Dicha condición deberá incorporarse como una condición de contorno más en la geometría que se cree en el software, asignándola a la superficie opuesta a la que se determine como fija y definiendo en ella el valor de deformación que se desee obtener. Posteriormente, en el Capítulo 9, se mostrará el procedimiento seguido para ello.

#### 6.2.5 Propuesta de las propiedades no-lineales de los materiales

Como ya se ha indicado en capítulos anteriores, la importancia del cálculo que realiza el método de la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo radica en la posibilidad de conocer el comportamiento del material en el rango no-lineal. Para ello, deberán tratarse los materiales introducidos en el código como materiales que puedan tener un comportamiento no-lineal, es decir, que sigan modelos de comportamiento plástico o daño. Si introducimos las propiedades del material para que siga un comportamiento elástico, estaremos modelizando un material que nunca sobrepasará su límite elástico. Consecuentemente nunca alcanzará un comportamiento no-lineal, sea cual sea su estado de tensión de deformación.

##### 6.2.5.1 Modelo de comportamiento que sigue cada material

Por lo anteriormente expuesto, se debe definir qué modelos de comportamiento van a seguir la fibra y la matriz que conforman los diferentes laminados del compuesto. Gracias a datos de numerosos ensayos realizados a diferentes materiales compuestos cuyos laminados estaban conformados de diferentes fibras y matrices, se ha podido observar el modelo de comportamiento que usualmente sigue cada uno de ellos. En el caso de estudio tenemos dos tipos diferentes de material: fibra y matriz.

- **Fibra:** la fibra empleada en los ensayos de referencia es fibra de vidrio *Eglass*. Las fibras en los compuestos suelen presentar un comportamiento mayoritariamente lineal, por lo que suele asignarse que siguen el modelo de comportamiento elástico. Esto es debido a que están formadas por filamentos de material con prácticamente ninguna

imperfección. No obstante, en un conjunto de fibras, estas pueden tener dispersión en sus propiedades, por lo que puede existir un determinado número de ellas en que su límite de rotura sea inferior al estándar. En la simulación, el conjunto de fibras se toma como un único material, por lo que la rotura de fibras sueltas repercutirá en la reducción de la rigidez del conjunto. Dado el comportamiento que presenta el material compuesto en el ensayo y, comprobando que, si solo permitimos que rompa la matriz, será imposible asimilar la curva del ensayo con la que origina el software. Se definirá que la fibra sigue el modelo de comportamiento de daño.

- **Matriz:** por otro lado, se ha podido estudiar que las matrices *epoxy* siguen también el modelo de comportamiento de daño, por lo que así se definirá para el cálculo en el software.

### 6.2.5.2 Propiedades no-lineales de los materiales

Para cada modelo distinto de comportamiento de material, existen una serie de propiedades que se consideran las variables encargadas de definir exactamente cómo va a verse representado dicho comportamiento. Visto desde la parte computacional, estas propiedades determinan las características de la curva tensión/deformación resultante del cálculo que realiza el programa. Es decir, determinan la pendiente de la curva en el rango lineal, el valor al que tiende la curva en el rango no-lineal y cuán rápido alcanza dicho valor. Para los materiales definidos en nuestro modelo, debido a que se ha determinado que todos siguen un tipo de comportamiento de daño, van a tener que introducirse las propiedades no-lineales siguientes: Límite elástico, Energía de fractura y Tensión de saturación. Además, deberán introducirse las propiedades lineales que nos facilitan en los datos del ensayo y que aparecen en la *Tabla 1*, Módulo de *Young* y Coeficiente de *Poisson*.

A continuación, se listan los valores de las propiedades no-lineales de cada componente:

- **Fibra de vidrio *Eglass***
  - Límite elástico: 2000000000 Pa
  - Energía de fractura: 21000000  $J/m_2$
- **Matriz de resina *epoxy SR1500/SD2505***
  - Límite elástico: 12000000 Pa
  - Energía de fractura: 400000  $J/m_2$



### 6.2.6 Condiciones de contorno impuestas en el modelo

Con tal de asemejar lo máximo posible el comportamiento que tiene la geometría creada en el software al comportamiento que tiene el material compuesto durante el ensayo en el laboratorio, se deben introducir una serie de condiciones de contorno que limiten el movimiento del modelo, o partes de este, en una dirección u otra, de tal forma que simule de forma veraz lo sucedido en el ensayo. En el caso de estudio, el ensayo que se realizó en la documentación de la referencia es un ensayo a tracción pura. Por lo tanto, para obtener un comportamiento uniaxial en la simulación, se impondrá una condición de contorno isoestática. Debe tenerse en consideración que, al someter una probeta al ensayo de tracción, ésta además de la deformación en la dirección paralela a la de aplicación de la tensión, sufrirá una deformación en forma de compresión en las dos direcciones perpendiculares a ella debido al efecto *Poisson* [20]. A causa de este hecho, para permitir que el software simule también dichas deformaciones compresivas y aproximar al máximo la simulación a la realidad, no se debe aplicar una restricción total de movimiento en las tres direcciones X,Y,Z del programa en la cara que se desea que quede fija. Entonces, para simular con éxito el efecto *Poisson*, se fijará el movimiento en dos de los costados de la cara deseada en las direcciones que no sean paralelas a la propia que sigue el costado, dejando esta última libre de movimiento. Además, se fijará la superficie de la cara sujeta en la dirección de aplicación de la tensión. A continuación, se van a listar las distintas condiciones de contorno aplicadas en el modelo para una mejor comprensión.

- **Condición de contorno 1:** Seleccionando tipo de elemento “Línea”. Restricción fijada en los ejes de direcciones X y Z, de esta forma el movimiento en la dirección Y está permitido.

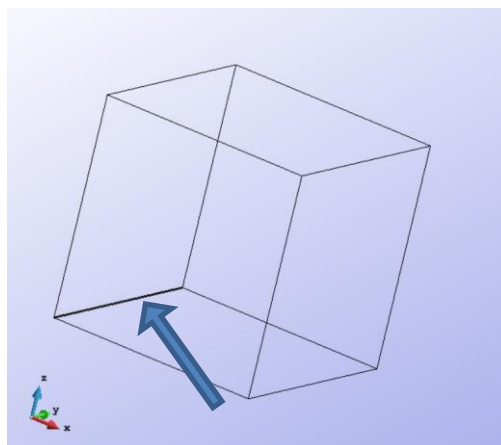


Figura 24. Detalle del elemento (línea subrayada) donde se aplica la condición de contorno 1 - Fuente propia

- **Condición de contorno 2:** Seleccionando tipo de elemento “Línea”. Restricción fijada en los ejes de direcciones X e Y, de esta forma el movimiento en la dirección Z está permitido.

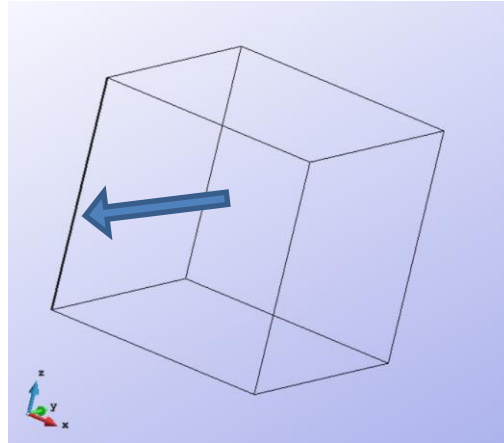


Figura 25. Detalle del elemento (línea subrayada) donde se aplica la condición de contorno 2 – Fuente propia

- **Condición de contorno 3:** Seleccionando tipo de elemento “Superficie”. Restricción fijada en la dirección X para impedir el movimiento de dicha superficie al aplicar una tensión a tracción en la pieza en la misma dirección.

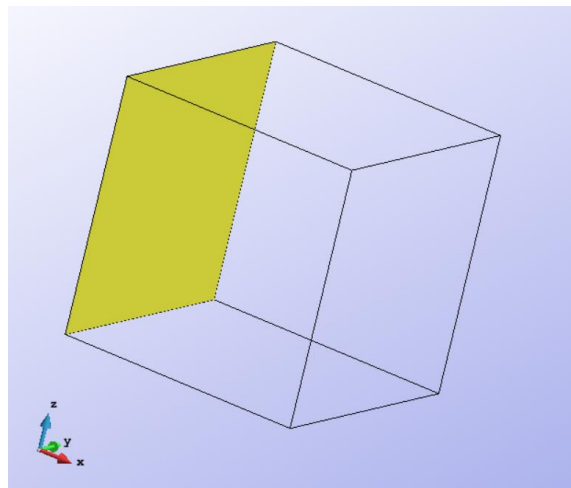


Figura 26. Detalle del elemento (superficie coloreada) donde se aplica la condición de contorno 3 - Fuente propia

- **Condición de contorno 4:** Seleccionando tipo de elemento “Superficie”. Restricción fijada en la dirección X y en la cara opuesta a la que se ha aplicado la condición de contorno 3. En este caso, como se expuso en el apartado 6.2.3, debe imponerse un valor de deformación de 0.034 m.

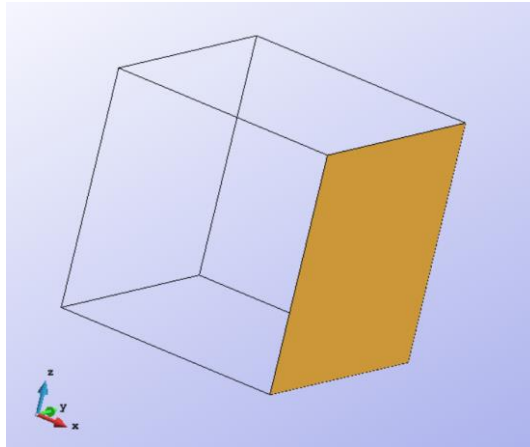


Figura 27. Detalle del elemento (superficie coloreada) donde se aplica la condición de contorno 4 - Fuente propia

### 6.2.7 Condiciones de mallado del modelo

A continuación, se listan las condiciones de mallado que se han determinado para el cálculo del modelo introducido en el software.

Para crear la malla, primero se ha asignado un tamaño de elemento de 1 metro. Además, se consideró al elemento tipo hexaédrico. Con este tamaño y tipo de elemento, se genera una malla con la siguiente cantidad de elementos y de nodos:

- Número de elementos: 1
- Número de nodos: 8

La orientación de los elementos de la malla será coincidente con los ejes globales. Por lo tanto, la orientación es de (0,0,0) respecto los ejes globales X, Y, Z. Con tal de definir la orientación de las fibras en los laminados, se deben referenciar éstas según unos ejes locales del elemento. Dichos ejes locales se definen externamente a la interfaz, introduciéndose manualmente en el archivo de datos.

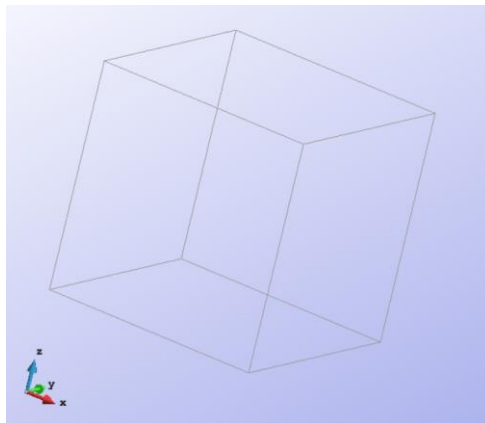


Figura 28. Malla generada en la geometría - Fuente propia



## Capítulo 7. Procedimiento seguido para la calibración del material

La calibración del material que se está validando con el software es seguramente una de las fases más importantes y con mayor carácter técnico a realizar durante todo el proceso de validación. Esta parte del trabajo requiere de ciertos conocimientos y aptitudes técnicas para comprender de forma completa el caso que se quiere reproducir, conocer la fase en la que se encuentra y a la que se quiere llegar, tomar las decisiones convenientes para lograr alcanzar el objetivo fijado, así como gestar las posteriores conclusiones al llegar a este objetivo y, que éstas sean adecuadas y lógicas. Por todas estas razones, en el presente capítulo se va a documentar el procedimiento que se ha seguido con el fin de calibrar el material implementado en *RamSeries*. Cabe esclarecer que, para el ejercicio de calibración se ha debido aplicar los conocimientos que se iban adquiriendo sobre la materia, dicho procedimiento se ha caracterizado por su repetición constante hasta llegar al objetivo cumplido. De esta forma, a partir de unas premisas más generales sobre el material de la validación, se iba comprobando paso a paso el comportamiento que tenía el material con éstas y si cumplía con ellas o no. Posteriormente, si se alcanzaba el objetivo, se generaban nuevas hipótesis más concretas para repetir el procedimiento hasta que se reflejase en el modelo un comportamiento lo más similar posible al que presenta el material en el ensayo.

El procedimiento seguido podría ser desglosado en las siguientes fases:

- **Fase 1:** Familiarización con la interfaz de *RamSeries* y con las diferentes propiedades del material que pueden modificarse en el software, con el fin de variar las características de la curva tensión/deformación que se origina al calcular con el software un modelo implementado.

Este punto se realiza con modelos muy simples y considerando que el material del cual están formados es acero y no compuesto, ya que el objetivo que quiere alcanzarse es simplemente el de adquirir experiencia y asentar los conocimientos teóricos estudiados. Primero, se implementan casos de comportamiento completamente elástico (rango lineal) y una vez conseguido el objetivo se modifica el comportamiento del material para que sea plástico (familiarización con rango no-lineal). En este proceso se aprende cómo estimar el punto donde se encuentra el límite elástico del material a partir de los datos del ensayo y qué variables o valores de propiedades del modelo hay que modificar para variar, como por

ejemplo, la pendiente de la curva, la curvatura que adopta la gráfica en el modelo plástico y, lo rápido que se alcanza la tensión de saturación. Para ello, se intenta reproducir diversos casos facilitados en la referencia [21].

- **Fase 2:** La siguiente fase del proceso complica el primer punto descrito anteriormente. Como ya se ha comentado, el ejercicio de calibración debe ser repetido reiteradamente para cada consideración hasta conseguir alcanzar el objetivo final prefijado. La meta por conseguir en este segundo paso ha sido la de asimilar el comportamiento en el rango, primero lineal y, después, no-lineal, de la curva del material compuesto implementado en el software con la del material del ensayo empírico de referencia. No obstante, en esta ocasión definiendo que el material está compuesto por un solo laminado.

Para ello, se toman las siguientes consideraciones:

- Inicialmente, se considera el material del modelo como un único laminado donde su fibra y su matriz constituyentes siguen un modelo de comportamiento elástico. De esta forma, se asegura que se obtendrá una conducta lineal del material. Se procede en este momento a asimilar las curvas en su rango de comportamiento lineal.
- Cuando se ha conseguido asimilar las curvas en el rango lineal con la primera consideración, se pasa a considerar la fibra elástica y la matriz plástica. Se sigue con la calibración hasta conseguir volver a cuadrar el comportamiento del material del ensayo con el del modelo implementado. Pero con estas consideraciones se observa que las curvas empiezan a divergir entre sí, incluso en el rango lineal.
- Por lo sucedido en el segundo punto, se considerará la fibra elástica de nuevo pero la matriz pasará a tener un comportamiento de daño. Se irán modificando las diferentes variables de los modelos de comportamiento insertados, para ver cómo caracterizan las formas de la curva e intentar conseguir volver a asimilar los comportamientos de la curva del ensayo con la del modelo. Pese a que no se logra.

En este segundo caso se pudo observar la complejidad existente a la hora de calibrar el material, simplemente por el hecho de considerarlo como un material compuesto, ya que se pasa de tener dos parámetros a variar a cuatro como mínimo. Además, se observa que, las pequeñas variaciones que se van originando en las curvas que dibujan la fibra y la matriz al modificar los valores de los diferentes parámetros de cada modelo de comportamiento, hacen que la curva resultante del compuesto vaya variando también. Por lo que en este punto se ha aprendido también qué parámetros modificar en el modelo según qué característica de la curva resultante se quiera variar. También cabe destacar que, mientras que en la primera fase los parámetros se modificaban dentro de la interfaz de *RamSeries*, en esta segunda fase no ha sido así. Para esta fase se empezó a utilizar el ejecutable del cual se habla en capítulos posteriores. Esto conllevó a

otro pequeño incremento de la dificultad de todo el proceso, ya que se debía aprender cómo funcionaba éste y de qué forma había que editar los archivos que debía leer para calcular los resultados del modelo. Añadir por último que debido a los resultados de los modelos obtenidos durante esta fase y a su comparación con los datos y resultados que facilitaba la referencia [21], se decide cambiar la referencia del ensayo a validar por otra. La nueva referencia, [11], es la que finalmente se empleó para la validación del material que se describe en el Capítulo 6. Esta decisión se toma ya que el modelo de la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo no es el más adecuado para simular el comportamiento a cortante de compuestos, y las curvas de la primera referencia estudiada representaban ensayos a cortante. Por esta razón no se lograba acabar de asimilar ni siquiera en el rango lineal las curvas, por lo que resultaba innecesario pretender asimilar el rango no-lineal.

- **Fase 3:** Esta es la última fase que se ha seguido para lograr calibrar el material implementado en el modelo. Durante ésta, el procedimiento a seguir ha sido similar al que se adoptó en la fase 2. La principal diferencia entre una y otra es que el material se define compuesto por dos laminados cuyas fibras están orientadas en distintas direcciones respecto a la dirección de aplicación de la tensión. A continuación, se listan las consideraciones tomadas:

- Se ha aprendido, gracias a las fases anteriores a ésta, que la primera labor a realizar para calibrar el material es la de asimilar las curvas del modelo y del ensayo en sus rangos lineales. Para ello, debe considerarse el hecho que en este caso están actuando en el compuesto dos laminados diferentes, que a su vez están formados cada uno por fibra y matriz. Las premisas adoptadas inicialmente para asimilar el comportamiento del material en el rango lineal de la curva son las de considerar a las fibras con un comportamiento elástico, ya que describen un comportamiento cuasi lineal y, a las matrices como plásticas, para conseguir hacer que la curva cambie de pendiente y coja curvatura. Se inicia el ejercicio de calibración hasta conseguir asimilar el rango lineal de las curvas y posteriormente se intenta ajustar lo máximo posible el rango no-lineal, pese a los modelos de comportamiento escogidos.

En este primer punto se consigue calibrar con éxito el comportamiento de ambas curvas en el rango lineal. Pero se observa que, considerando a las matrices como plásticas, el programa da problemas de convergencia y solicita demasiado tiempo de cálculo computacional.

- En consecuencia, al ser el Epoxy una resina termoestable, se le considera con ley constitutiva tipo daño en lugar de plástica, mientras que las fibras permanecerán determinadas como elásticas. Con esta configuración, se vuelve a obtener

satisfactoriamente la validación del comportamiento del material en el rango lineal pero no se obtiene en el rango no-lineal. Se observa en dicho momento que, por mucho que se dañe al máximo la matriz para conseguir dar la curvatura correspondiente a la zona no-lineal de la curva del modelo, la curvatura varía escasamente unos grados. Por esta razón se deduce que, además de dañar la matriz, deberá dañarse también la fibra para originar un cambio de pendiente de la curva del modelo más acentuado. La explicación de dicho comportamiento es que son las fibras a cero grados las responsables de dar rigidez al laminado, por lo tanto, si se necesita una pérdida de rigidez en el laminado, deberán ser estas las que se rompan al llegar al punto.

- Dada la deducción que se obtiene del segundo paso se procede a considerar que, tanto las fibras como las matrices de los laminados del compuesto, siguen un comportamiento de daño. Al proceder a validar el modelo con esta configuración debe aplicarse la experiencia adquirida durante la realización de todo el procedimiento descrito a lo largo de este trabajo. Por esta razón, primero se procede a asimilar las curvas en el rango lineal del comportamiento. Una vez se ha conseguido asimilar este primer rango, se procede a asimilar el resto de la curva. En este último paso se pudo concluir que, debido a la formulación matemática implementada para calcular y obtener el comportamiento del modelo, no se podía acabar de asemejar por completo las curvas. Esto es así ya que la formulación no permite incluir comportamientos mixtos de endurecimiento – ablandamiento, característica que si presenta la curva del ensayo de referencia. Por esta razón, se admite cierta divergencia entre las curvas en su rango no-lineal. Pese a este hecho, se finaliza la validación procediendo a intentar asimilar por lo menos uno de los dos comportamientos que presenta la curva. En este caso se procede a simular el comportamiento de ablandamiento que presenta en los últimos estamentos de deformación mediante la variación de las diferentes propiedades de cada material constitutivo de los laminados. Después del ejercicio de calibración, se acabó confirmando que también se podía lograr asimilar con el software este comportamiento final que presenta la curva del ensayo de referencia, pese a la divergencia existente entre las curvas.

Por consiguiente, gracias al procedimiento seguido durante la validación, se han podido ir planteando casos nuevos del mismo material a validar. Asimismo, se ha observado que, variando la forma en la que se consideraba que estaba constituido el material y las características que definían su comportamiento en cada caso, se lograba sacar conclusiones y generar nuevas hipótesis para poder seguir con el proceso y acabar logrando la validación, casi total, del modelo del compuesto implementado.



## Capítulo 8. Resultados del modelo

### 8.1 Métodos para visualizar los resultados obtenidos

Previamente a mostrar los resultados obtenidos con el software, se explicará el procedimiento que debe seguirse para visualizar los datos de los resultados y mostrar las curvas de estos en el programa *GiD*.

Una vez se ha calculado el caso de estudio mediante el ejecutable tal como se explica en el Capítulo 9, se debe abrir el caso a través de los programas *Ramseries* o *GiD* para visualizar los resultados que se han obtenido. En este caso, el programa utilizado será *GiD*. Una vez se ha abierto el caso, sin clicar el icono de calcular, se pasará al apartado de postproceso clicando el icono que aparece en la barra de herramientas superior de la interfaz tal como muestra la *figura 29*.

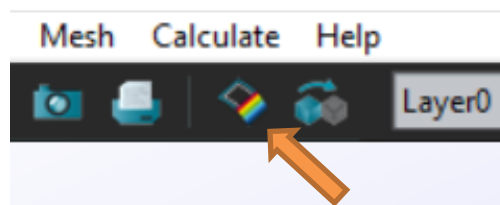
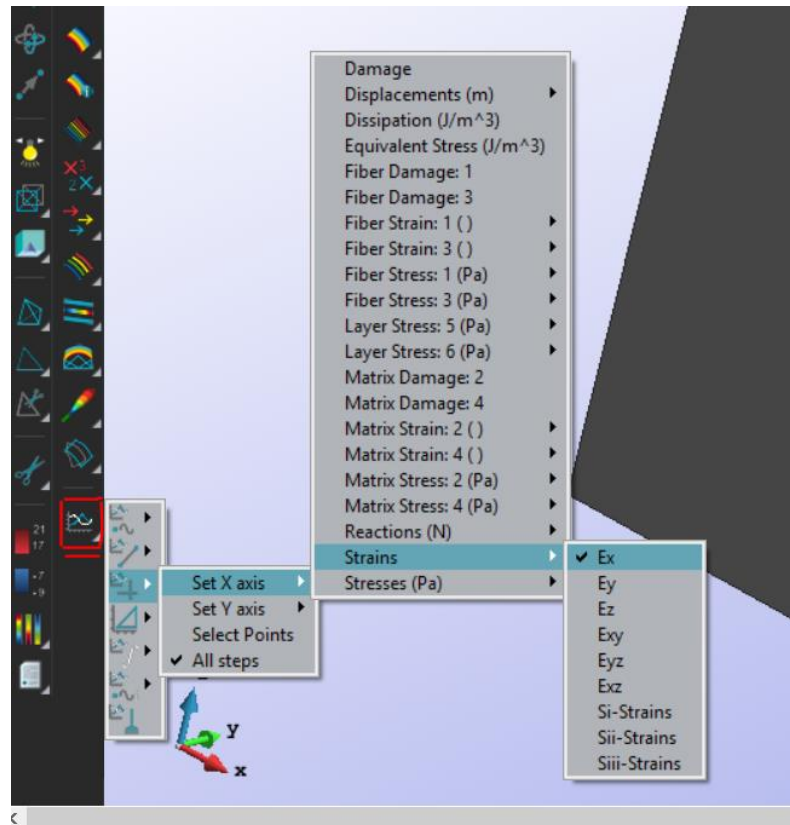


Figura 29. Detalle del icono de *GiD* que permite pasar de pre a postproceso y viceversa - Fuente propia

Dentro de postproceso, en la barra de herramientas lateral izquierda, el programa muestra una opción para poder graficar los resultados obtenidos. Mediante esta herramienta se visualizarán las curvas que se deseen para poder comparar los resultados del ensayo con los obtenidos en el software.

El procedimiento a seguir es el siguiente: Clicar el icono de la herramienta mencionada, *figura 30*, y en el desplegable que aparece clicar el tercer icono. Dentro de éste nos aparecen varias opciones, “*Set X axis*”, “*Set Y axis*” y “*Select points*”. Para representar, por ejemplo, la curva tensión/deformación del compuesto. Se seleccionará dentro de “*Set X axis*” la variable que se desea situar en el eje X de la gráfica, en este caso es la deformación en la dirección longitudinal de la pieza ( $Strain > Ex$ ). También se seleccionará dentro de “*Set Y axis*” la variable que se desea situar en el eje Y de la gráfica, en este caso la tensión en la dirección longitudinal de la pieza

( $Stress > S_x$ ). Por último, se seleccionará mediante la opción “*Select points*”, el punto en el que se desee estudiar la evolución de las variables seleccionadas. Por ejemplo, escribir el punto 0,0, que pertenece a uno de los vértices de la geometría y presionar “*Enter*”. Seguidamente el programa generará una ventana complementaria, “*Graphs window*”, con la curva deseada ya representada.



**Figura 30.** Ejemplo del proceso de selección a seguir para graficar los resultados del programa mediante la herramienta “*graphs*” que incluye (En imagen, selección de la variable a representar en el eje X) - Fuente propia

Cabe indicar que, en la ventana donde aparece representada la curva, existe una opción donde aparecen listados todos los valores de los resultados obtenidos de las variables a representar seleccionadas. Esta opción resulta útil para visualizar de una forma rápida los resultados numéricos y comprobar que no existen irregularidades en ellos. En el caso de este trabajo, también se ha empleado esta herramienta para extraer los datos del programa e insertarlos en MatLab, otra herramienta para plotear juntas diferentes curvas. Para visualizar el listado de datos debe seguirse el siguiente procedimiento: Dentro de la ventana “*Graphs Window*”, seleccionar la pestaña “*Options*” que aparece en su margen superior, a la izquierda. Una vez dentro de ésta, clicar el botón “*Show table*”. Acto seguido aparecerá una nueva ventana, “*Graph values*” con el listado de datos numéricos. En las *figuras 31 y 32* se puede observar lo que se ha descrito.

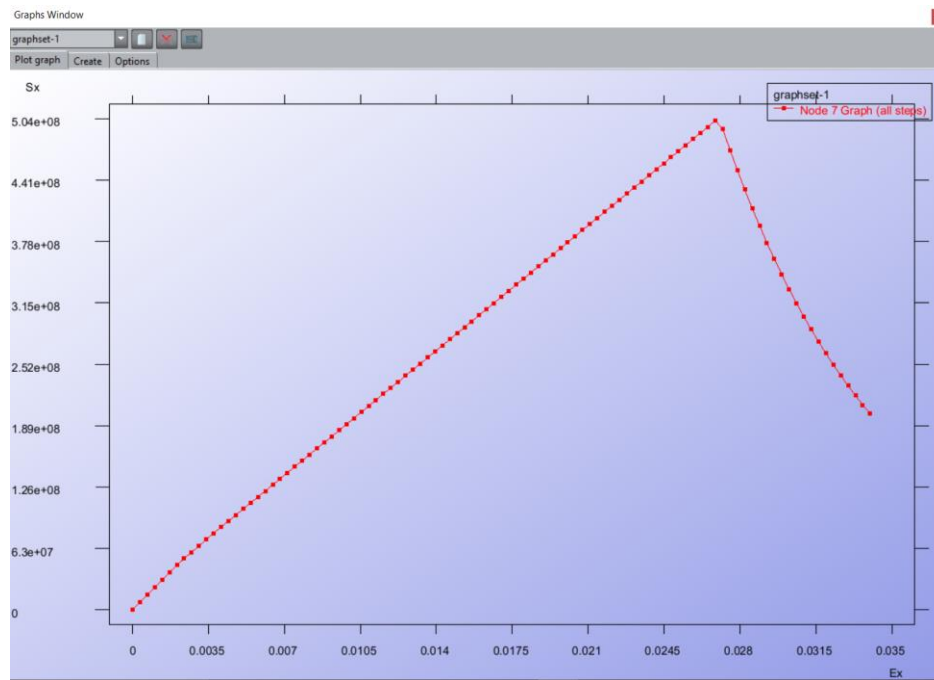


Figura 31. Ejemplo de una gráfica mostrada con la herramienta de GiD descrita - Fuente propia

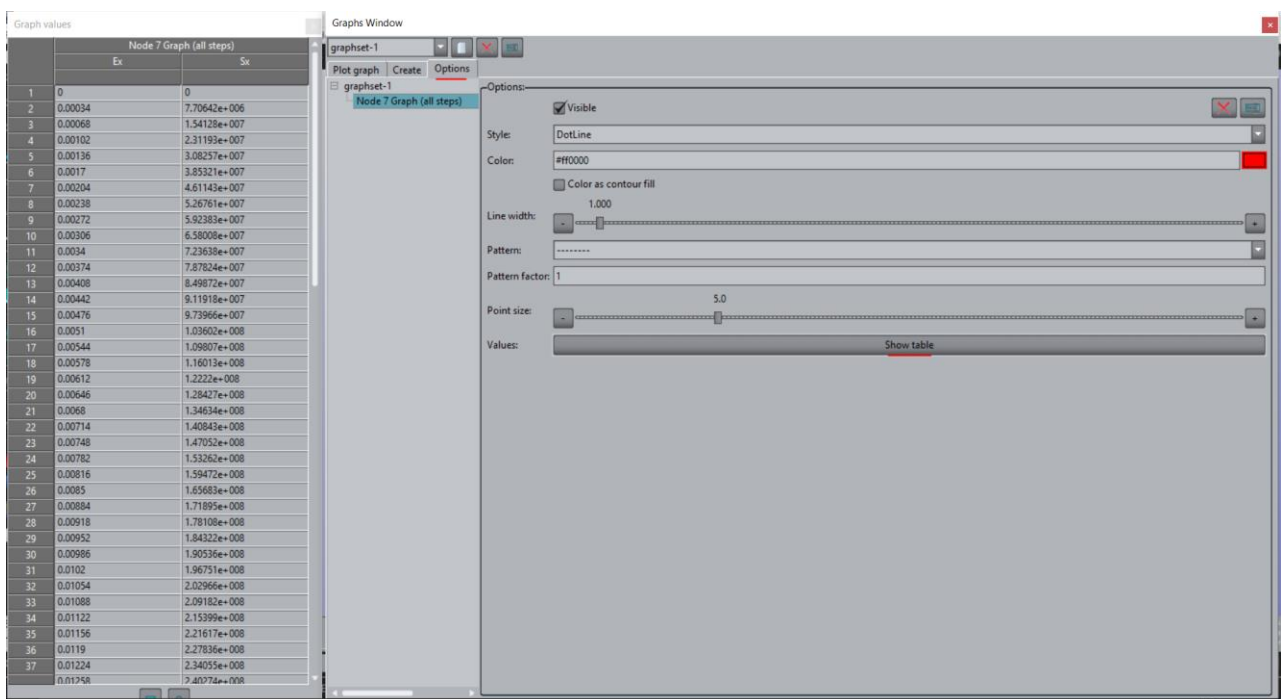


Figura 32. Detalle de la ventana "Graph values" y cómo desplegarla dentro de la pestaña "Options" de la ventana "Graphs window" - Fuente propia

Además del ploteo de las gráficas, para una mejor visualización de los resultados numéricos generales, se puede desplegar la ventana de resultados haciendo clic en el icono “Results window” que aparece en la barra de herramientas superior. Dentro de esta ventana, seleccionar “View” > “Contour Fill” y acto seguido nos aparecerá un listado con todas las variables del cálculo de las que podemos obtener sus datos.

Al seleccionar cualquiera de las variables el programa representa los resultados en la propia geometría generada, mediante una leyenda de colores, como se observará en el siguiente apartado. Además, esta función permite visualizar los resultados calculados en cada incremento realizado por el programa. Solo debe indicarse el número de incremento a visualizar en el apartado “Step”.

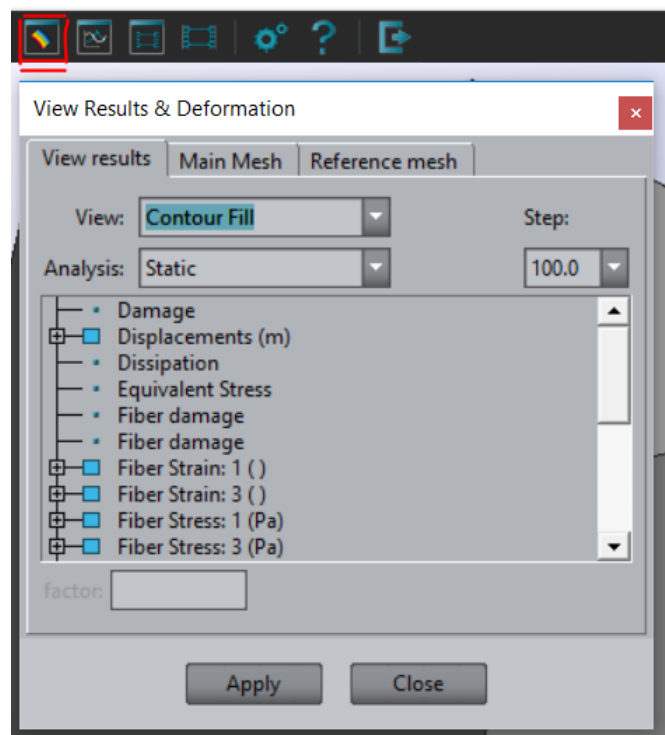


Figura 33. Detalle de la ventana de resultados que facilita el software – Fuente propia

## 8.2 Datos de los resultados obtenidos

A continuación, se listarán los resultados obtenidos con el modelo implementado para diferentes variables y direcciones de coordenadas.

### 8.2.1 Desplazamientos

Para poder comprobar que, gracias a las condiciones de contorno introducidas en el modelo, la formulación simula el efecto *Poisson* que en la realidad se presenta en la probeta de ensayo, deberá prestarse atención a los desplazamientos que se generan en los tres ejes de coordenadas. Debe comprobarse que existe deformación a tracción en la dirección longitudinal

de la pieza, X y que el valor máximo de ésta se sitúa en las inmediaciones de la superficie desde la que se aplica la carga. Además, debe existir un estrechamiento de la pieza en las dos direcciones restantes Y y Z, ya que es así como sucede en la realidad.

- **Desplazamientos en el eje de coordenadas X**

Se confirma que el desplazamiento en la dirección X alcanza el valor introducido como condición de contorno en el modelo. Además, en la *figura 34* se puede observar que este valor se alcanza en las inmediaciones de la cara de la geometría donde se aplica la carga.

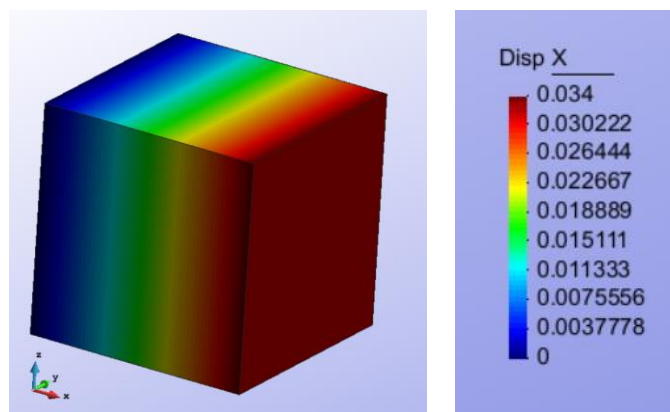


Figura 34. Resultados del desplazamiento en la dirección X - Fuente propia

- **Desplazamientos en el eje de coordenadas Y**

El desplazamiento en la dirección Y simula el estrechamiento por efecto *Poisson* esperado. Además, en la leyenda de la *figura 35* se observa que, comparados con los valores de desplazamiento en el eje X, los valores en la dirección Y son mucho más pequeños.

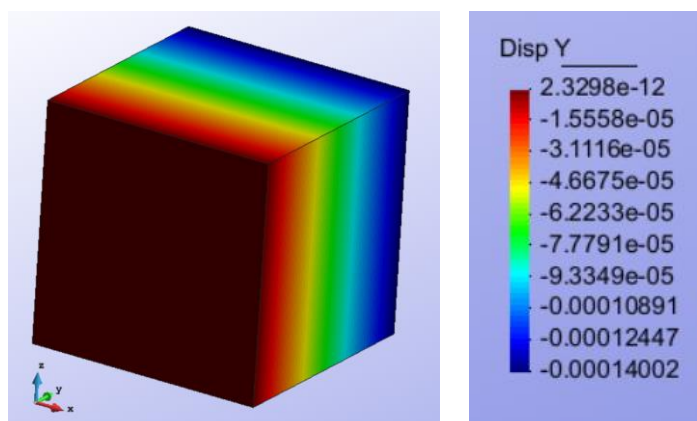


Figura 35. Resultados del desplazamiento en la dirección Y - Fuente propia

- **Desplazamientos en el eje de coordenadas Z**

La situación en la dirección Z es la esperada, representando valores iguales a los sufridos en la dirección Y. A continuación, se muestra en la *figura 36* el cambio de dirección del efecto de Poisson mostrado en el eje Z.

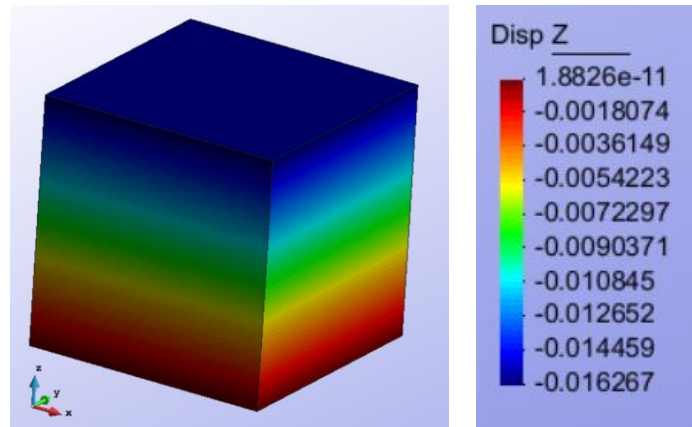


Figura 36. Resultados del desplazamiento en la dirección Z - Fuente propia

### 8.2.2 Deformaciones del compuesto

Las deformaciones sufridas en la geometría que representa el compuesto son uniformes y muestran que se ha alcanzado, en su dirección longitudinal, el valor de deformación introducido como condición de contorno en el modelo que se implementó para su cálculo. Además, se observa que en las direcciones de los ejes Y y Z las deformaciones del compuesto son mucho menores y tienen valor negativo, simulando de esta forma el comportamiento que presenta la pieza durante el ensayo en dichas direcciones debido al efecto *Poisson*. Seguidamente se muestra en la *figura 37* los resultados que se visualizan en *GiD*.

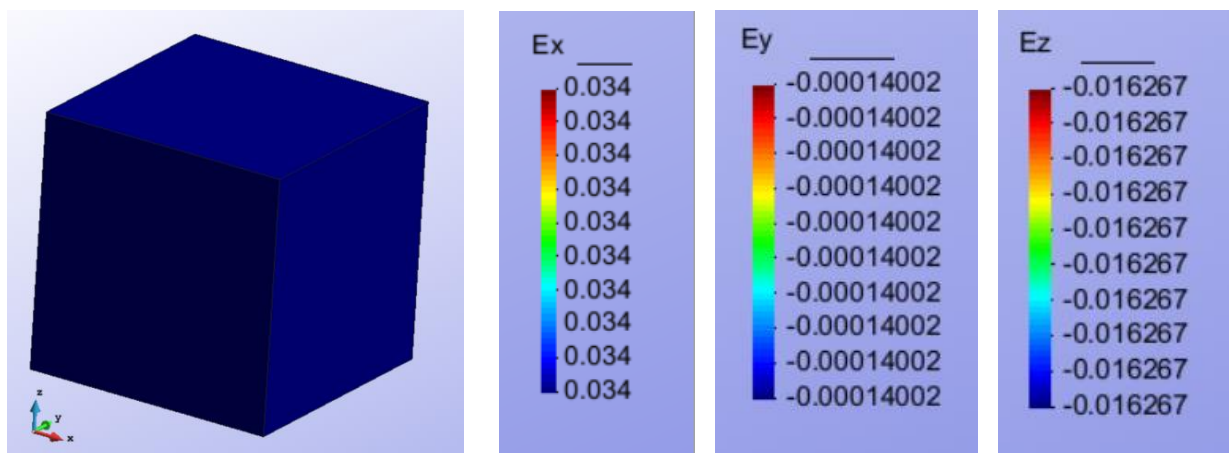


Figura 37. Resultados de las deformaciones sufridas en las direcciones X,Y,Z - Fuente propia



### 8.2.3 Daño generado en fibra y matriz

El porcentaje de daño que presentan las fibras y las matrices en el compuesto es un indicativo de cuan rotos están estos componentes en el material después de aplicarles las condiciones y propiedades definidas. A continuación, se listan los valores de daño presentados en cada una de las fibras y de las matrices del compuesto.

- Daño en fibras:
  - **Fibra 1:** la cantidad de daño en la fibra 1 es del 68.7 %. Este valor es usual para el tipo de fibra y condiciones establecidas. Puede concluirse que para este valor de daño el laminado falla y se produce la rotura.
  - **Fibra 2:** la fibra 2 no resulta dañada en la simulación. Presenta un porcentaje de daño del 0 %. Esto es debido a la disposición que tiene, estando a noventa grados respecto la dirección de aplicación de la tensión.
- Daño en matrices:
  - **Matriz 1:** el daño originado en la matriz 1 es del 94.3 %. Por lo tanto, se puede considerar que la matriz ha roto aproximadamente en su totalidad. Pese a esto, como la fibra 1 no está dañada por completo, el compuesto sigue resistiendo.
  - **Matriz 2:** el valor del daño en la matriz 2 es del 98.1 %. Esta matriz también se considera totalmente rota. Como se observa, el valor del daño es mayor en esta segunda matriz. Esto es debido a la disposición de las fibras, ya que la fibra 1 ofrece mayor resistencia a la tensión aplicada, estando orientada a cero grados respecto a ésta, que la resistencia que ofrece la fibra 2 estando orientada a noventa grados.

El daño completo en las dos matrices puede interpretarse como una delaminación de la capa a noventa grados que provoca posteriormente el colapso de la probeta.

A continuación, se adjunta en la *figura 38* los valores, en tanto por uno, de daño facilitados en GiD e indicados en este apartado.

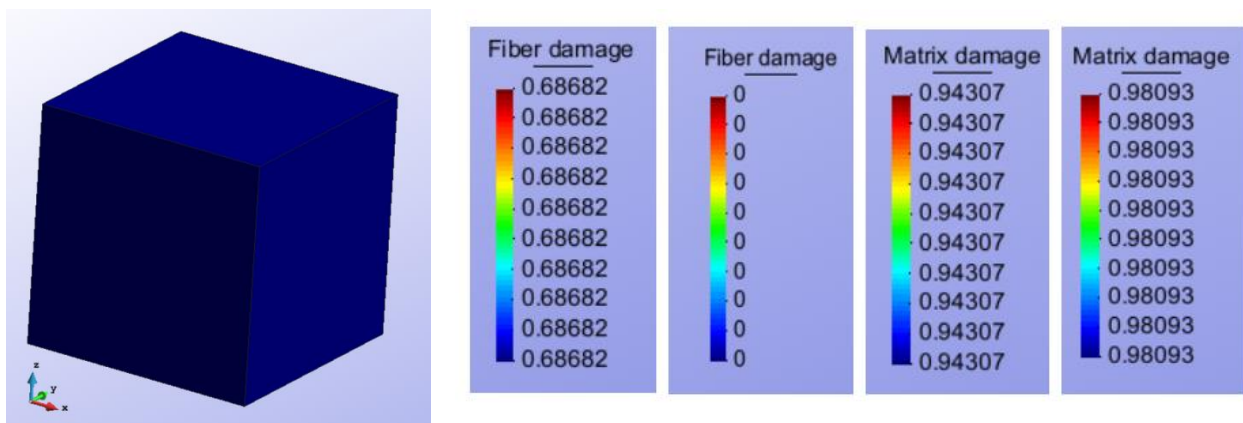


Figura 38. De izquierda a derecha, valor de daño sufrido en fibra 1, fibra 2, matriz 1, matriz 2 - Fuente propia

### 8.2.4 Tensiones soportadas

- **Tensiones en el compuesto**

Las principales tensiones que soporta el compuesto son las generadas debido al esfuerzo a tracción que se aplica al modelo para su simulación. Éste esfuerzo se aplica en la dirección del eje de coordenadas X, por lo que deben estudiarse los valores de tensión en dicha dirección. Según los resultados del software, el valor de las tensiones que ha soportado la pieza implementada durante el cálculo ha sido de aproximadamente 201.3 megapascuales. Esta tensión que ha soportado el material, es la resultante de las tensiones soportadas por fibras y matrices de cada uno de los laminados. En la siguiente figura se muestran los resultados observados en el software.

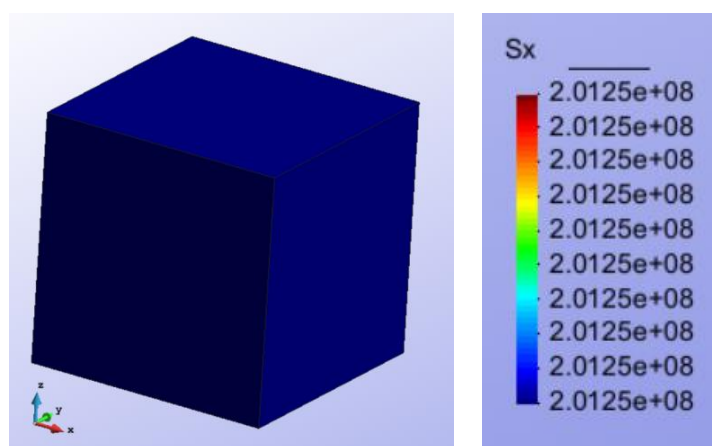


Figura 39. Resultados de las tensiones sufridas por el compuesto en la dirección X - Fuente propia

- **Tensiones en las fibras**

Como ya se ha indicado anteriormente, el material compuesto del que está formada la geometría del modelo está formado por dos laminados: Uno a cero grados, siguiendo la dirección longitudinal de deformación (X) y otro a noventa grados, siguiendo la dirección perpendicular a la deformación (Y). A causa de esta configuración, las tensiones que sufrirán las fibras variarán según estén direccionadas en el laminado. Para las fibras direccionadas en la dirección de deformación, las tensiones que deben estudiarse son las que se originan en el sentido de deformación de la pieza, eje X. Para las fibras dispuestas perpendicularmente al sentido de deformación de la pieza, las tensiones que deben estudiarse son las que se originan perpendicularmente a la deformación de la pieza, eje Y. Esto es debido a que las tensiones y deformaciones del laminado están referenciadas respecto a los ejes locales de la fibra. Siendo el eje local X en la fibra el que sigue la propia dirección de la fibra.



- **Fibra 1**

El valor de las tensiones que sufre la fibra 1, dispuesta a cero grados, es uniforme en toda la pieza y tiene un valor de aproximadamente 789 megapascals. Esta fibra es la que soporta la mayoría de esfuerzos en el modelo, ya que está dirigida en la misma dirección que la deformación. Por lo que era de esperar que suportara valores de tensión elevados.

- **Fibra 2**

El valor de las tensiones que sufre la fibra 2, dispuesta a noventa grados, también presenta una distribución uniforme en toda la pieza y tiene un valor de aproximadamente 4.62 megapascals. Esta fibra, al estar dispuesta perpendicularmente a la deformación, soporta esfuerzos a tracción debidos al efecto Poisson y se esperaba que las tensiones que soportaría serían bastante inferiores respecto a las de la fibra 1, como se ha confirmado.

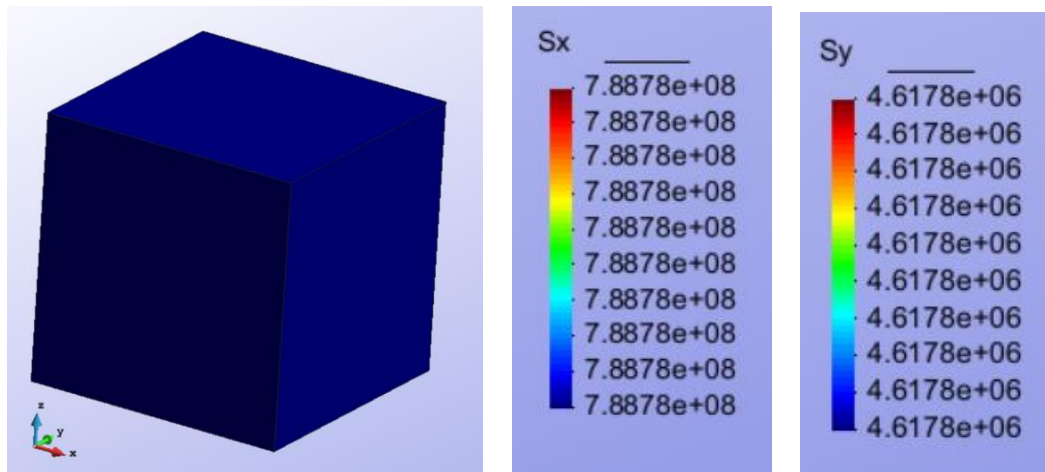


Figura 40. Resultados de las tensiones sufridas por la Fibra 1 (Sx) y la Fibra 2 (Sy) - Fuente propia

- **Tensiones en las matrices**

Puesto que las matrices son las encargadas de dar uniformidad y solidez a los laminados, las tensiones que éstas sufran deberán estudiarse también según la dirección que tengan las fibras que engloban.

- **Matriz 1**

La matriz 1 es la encargada de conformar el laminado 1, en el que se encuentra también la fibra 1, por lo que dicha matriz soportará las tensiones en la misma dirección que la fibra. El valor de las tensiones que la matriz está soportando en el cálculo es de 6.97 megapascals y se reparte uniformemente por toda la pieza. Nótese que el valor que soporta la matriz es inferior al que está soportando la fibra que lleva el laminado 1, ya que la fibra es capaz de soportar mayores tensiones, quedando asignada a la matriz la función de dar uniformidad

al laminado. Pese a esto, el valor de tensión que se ha obtenido es bastante elevado para las tensiones que puede llegar a soportar y es debido a esto que el valor del daño en la matriz es también significativo.

- **Matriz 2**

La matriz 2 es la encargada de proporcionar la uniformidad necesaria al laminado 2. En este laminado las tensiones en la fibra se dan en la dirección del eje de coordenadas Y, por lo que las tensiones soportadas por la matriz también deben estudiarse en esta dirección. El valor de las tensiones que soporta la matriz 2 es de 4.62 megapascasles y también se reparte uniformemente. Como se observa, este valor es idéntico al obtenido en la Fibra 2, cumpliéndose la condición de iso-tensión en la dirección en Serie del laminado. Además, ya se ha mencionado que este valor es muy elevado para las propiedades que tiene la matriz, originando porcentajes altos de daño sufrido en ella.

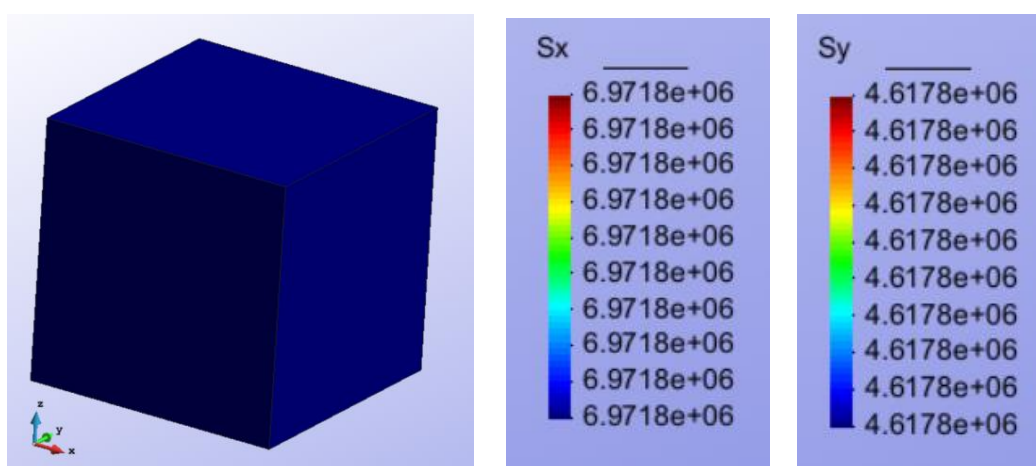


Figura 41. Resultados de las tensiones sufridas por la Matriz 1 ( $S_x$ ) y la Matriz 2 ( $S_y$ ) - Fuente propia

### 8.2.5 Curvas tensión/deformación obtenidas

En la *figura 42*, se puede observar una representación del conjunto de curvas tensión/deformación que representan los resultados generados por el software junto con la curva del ensayo de laboratorio para poder comparar de manera visual los resultados obtenidos. Los componentes que representan las curvas son, de arriba a abajo: Fibra 1 y Fibra 2, Laminado 1, Compuesto de la simulación numérica, Compuesto del ensayo, Laminado 2, Matriz 1 y Matriz 2. Además, la curva estudia el comportamiento del material en la dirección de aplicación de la tensión.

Como se analiza, los datos de la curva obtenida en el cálculo del programa coinciden con los de la curva del ensayo en el rango lineal, pero distan en el rango no-lineal del material aplicado.

Pese a esto, los datos en las secciones finales de las curvas, correspondientes al comportamiento de ablandamiento que presenta el compuesto, si que coinciden. También se pueden ver reflejados en las curvas los valores que se han explicado en este capítulo de deformación y tensión para el compuesto, las fibras, las matrices y los laminados determinados.

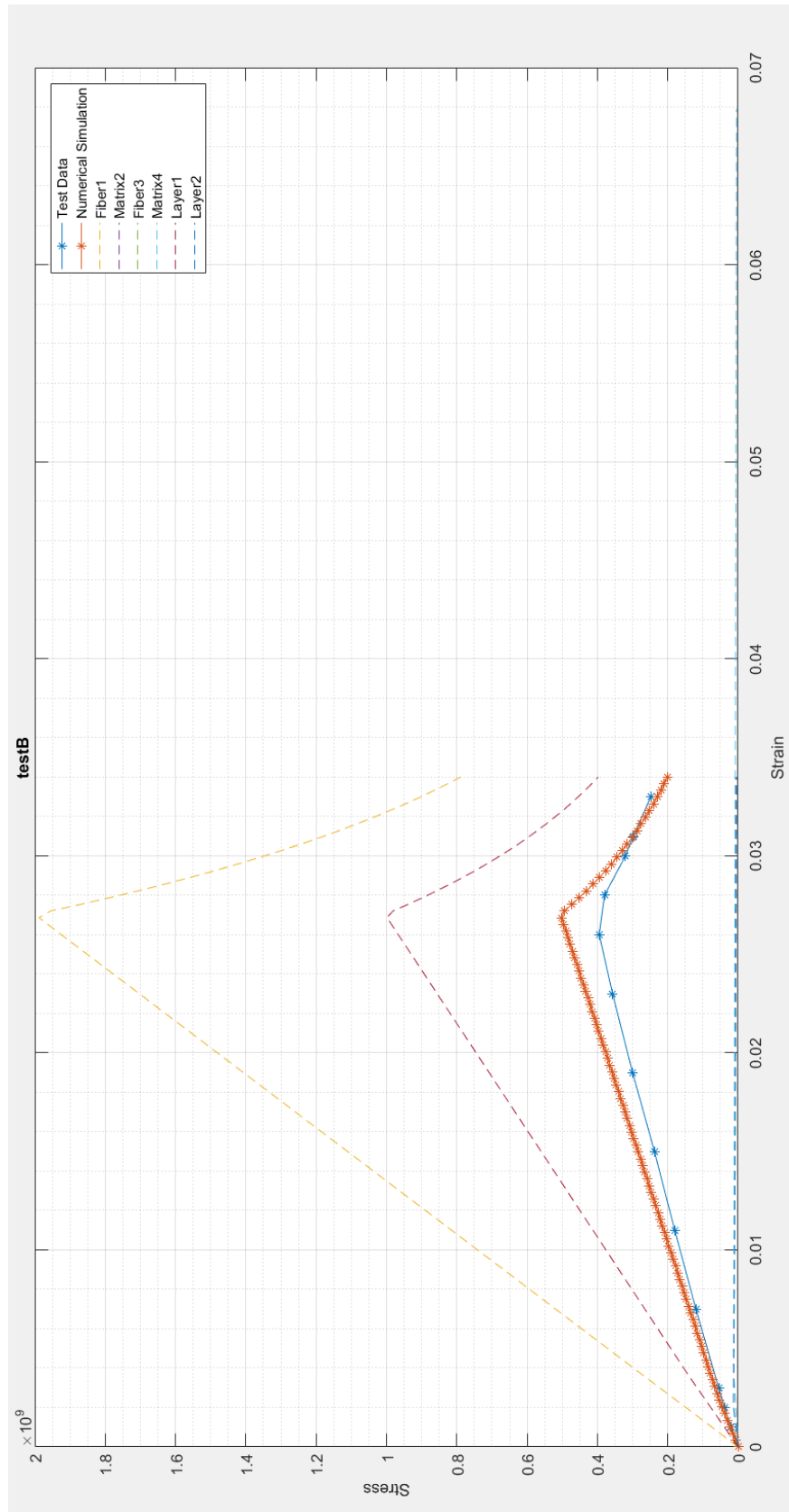


Figura 42. Representación de las curvas tensión/deformación, en la dirección de aplicación de la tensión, de los diferentes componentes del compuesto del software, del compuesto generado en el software y del compuesto ensayado – Fuente propia

En la siguiente figura se adjunta una representación del conjunto de curvas tensión/deformación sufridas en el modelo, pero esta vez en la dirección perpendicular a la de aplicación de la tensión.

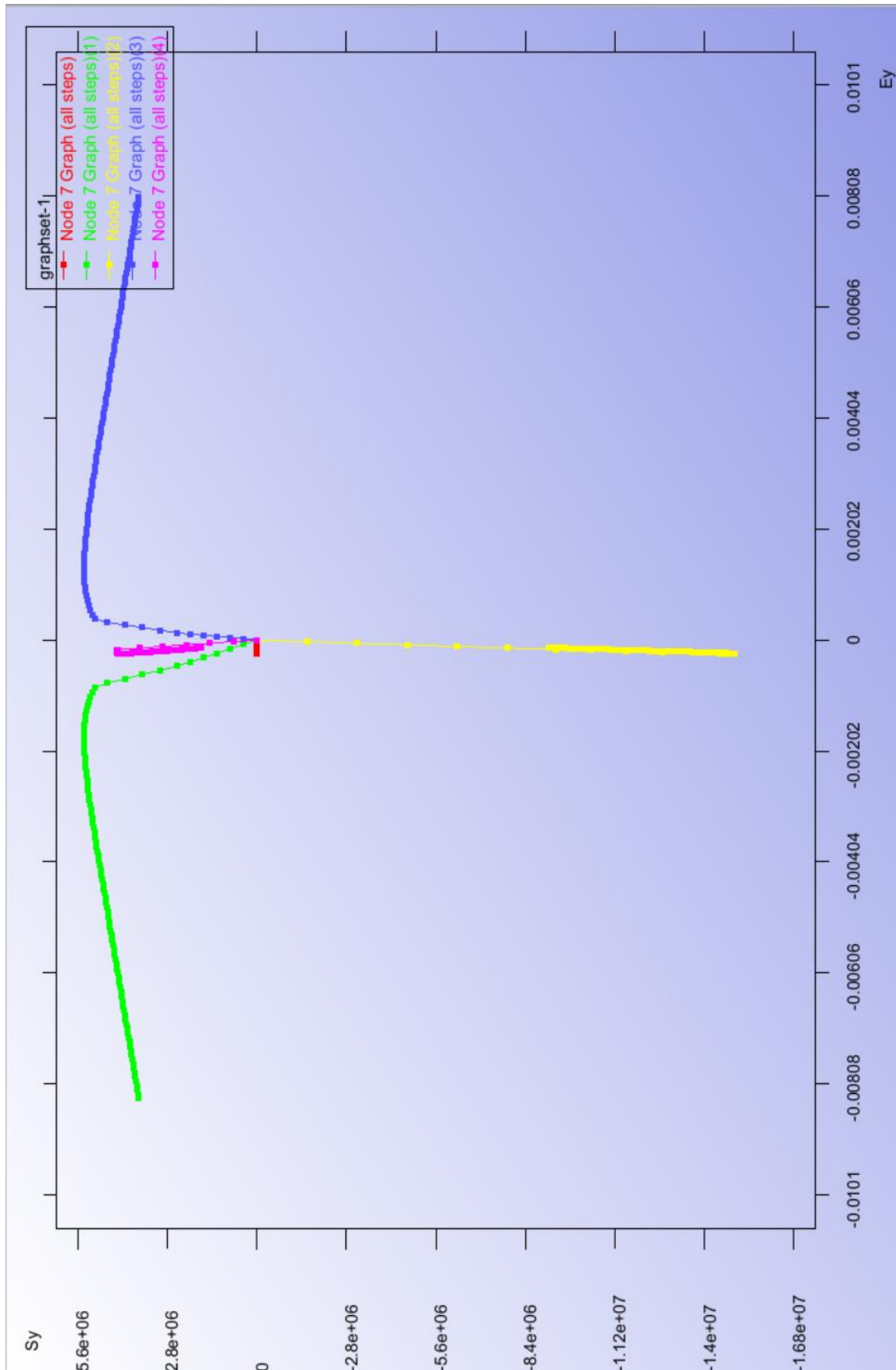


Figura 43. Representación de las curvas tensión/deformación, en la dirección perpendicular a la de aplicación de la tensión, de los diferentes componentes del compuesto del software, del compuesto generado en el software y del compuesto ensayado – Fuente propia

La *figura 44* muestra una comparación de los resultados numéricos que se obtienen durante el ensayo con los que se obtienen al realizar el cálculo numérico. Cabe indicar que el Módulo de Young que aparece en la tabla es producto de la división de los valores de tensión entre los de deformación de cada curva, y que éste se emplea para obtener el porcentaje de error que hay en los resultados obtenidos por el software. También debe indicarse que en el cálculo numérico se obtienen muchos más datos de puntos intermedios a los expuestos, hasta llegar a los cien incrementos solicitados. Pero para esta tabla se han escogido los que equivalen a los suministrados por la referencia [11] donde se muestra el ensayo realizado.

Comparación de los Módulos de Young obtenidos en ensayo y cálculo numérico				
Deformación	E (Ensayo)	E (Software)		Error (%)
0.001	2.00E+10	2.27E+10		11.89
0.002	1.90E+10	2.26E+10		15.93
0.003	1.83E+10	2.15E+10		14.73
0.007	1.71E+10	1.97E+10		12.98
0.011	1.64E+10	1.92E+10		14.77
0.015	1.59E+10	1.89E+10		16.05
0.019	1.58E+10	1.88E+10		16.01
0.023	1.55E+10	1.87E+10		17.00
0.026	1.52E+10	1.87E+10		18.76
0.028	1.36E+10	1.52E+10		10.71
0.03	1.07E+10	1.09E+10		1.96
0.031	9.61E+09	9.20E+09		4.45
0.033	7.52E+09	6.60E+09		13.79

**Figura 44.** Comparación de resultados de la curva del ensayo vs resultados de la curva del software - Fuente propia





## Capítulo 9. Documentación de la validación

En este capítulo se explicará el procedimiento que se ha seguido para llevar a cabo las validaciones realizadas. De esta forma, la documentación servirá de guía por si alguna otra persona quisiera reproducir este mismo caso.

### 9.1 Definición en *RamSeries* de la geometría deseada

La primera tarea que realizar es la de conformar en la interfaz del software la geometría de la pieza. Para ello, se deberá primero crear las superficies que conforman el volumen total del objeto. Dentro del programa deberá dirigirse al icono de la barra de herramientas lateral izquierda "*Create Object*". Ya que la pieza que se ha ensayado tiene forma rectangular, en el desplegable que aparece al clicar el icono, seleccionar la opción "*Rectangle*". Entonces, el software requerirá que introduzcamos un primer punto donde generar la superficie, escribir el punto de coordenadas de origen 0,0 y seguidamente presionar la tecla "*Enter*". Una vez definido el punto de origen donde se creará la figura, el programa requerirá que introduzcamos un segundo punto para crear definitivamente la superficie. El segundo punto al que se refiere el programa es el que conformaría la diagonal desde el vértice del rectángulo creado hasta su vértice opuesto. Por lo que tendrá valores de coordenadas diferentes tanto para X como para Y. En el caso que se ha generado, las longitudes de los costados de la superficie son iguales tanto en X, Y y Z y de valor igual a 1, por lo que se introducirá el punto 1,1 y se volverá a presionar la tecla "*Enter*".

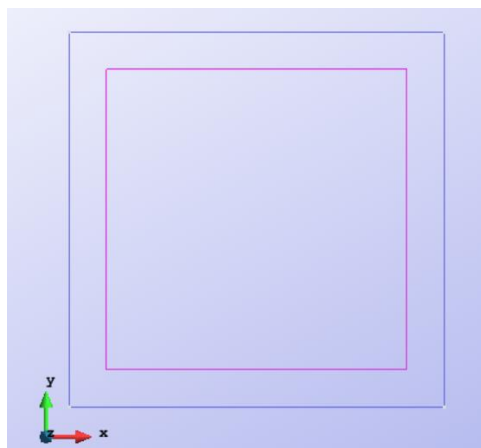


Figura 45. Superficie creada con *RamSeries* siguiendo el procedimiento expuesto – Fuente propia

Una vez creada la superficie de una de las caras de nuestro volumen, hay dos posibles procedimientos a seguir: O se van conformando a partir de ésta las diferentes superficies que forman la totalidad del volumen, conociendo los puntos donde están situados sus vértices; o se utiliza la herramienta que incluye el software para copiar elementos creados y generar nuevos. La segunda opción es mucho más rápida y es la que se ha seguido durante este trabajo por lo que se explicará ésta.

Para copiar la superficie y crear el volumen deseado, se debe seleccionar en la barra superior del programa la casilla "Utilities" > "Copy". Aparecerá un menú complementario en el que debe seleccionarse, en primer lugar, la opción "Surfaces" en el desplegable que aparece en "Entities type", puesto que lo que se quiere copiar es una superficie. También deberá definirse el punto en el que se quiere copiar dicha superficie en el apartado "Second point". Dado que la longitud de los costados del volumen que se desea tiene el mismo valor en los tres ejes principales, deberá escribirse el mismo valor que tienen los costados en los ejes X e Y, pero en este caso en Z, en nuestro caso dicho valor es igual a 1. Por último, seleccionar "Volumes" en el desplegable de la opción "Do extrude" ya que de esta forma el software crea por si solo el volumen requerido. Seguidamente clicar el botón "Select" y seleccionar en la pantalla la superficie previamente creada. A continuación, pulsar la tecla "Esc" para confirmar la selección. De esta forma se habrá creado en la pantalla el volumen con el que se quiere trabajar. En la *figura 46* se puede observar el menú de la función "Copy" ya editado.

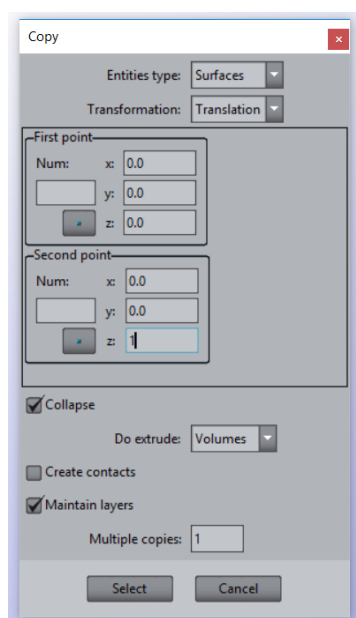


Figura 46. Menú de la función "Copy" configurado para el caso explicado - Fuente propia

## 9.2 Introducción de las condiciones de contorno

La determinación de las condiciones de contorno en el modelo del software es una de las tareas primordiales para que el programa sea capaz de calcular correctamente y simular de forma satisfactoria el comportamiento que sigue el material en el caso real que se quiere reproducir. Para ello, inicialmente deben aplicarse conocimientos básicos de cálculo de estructuras para determinar qué partes de la pieza deberán estar fijas o libres. En este caso, la justificación de la selección de condiciones de contorno se ha realizado anteriormente en el apartado 6.2.6. A continuación se explicará el procedimiento a seguir para definir las en el software. Para simular el comportamiento obtenido en el ensayo de referencia, deberán fijarse cuatro condiciones de contorno. Dos de ellas a elementos tipo Línea y las otras dos a elementos tipo Superficie.

Para ello, en el menú que aparece a la izquierda justo después de la barra de herramientas que se ha mencionado en el punto anterior, debe seleccionarse el desplegable “*Constraints*” y, dentro de éste, hacer doble clic en “*Fixed Constraints*” cada vez que se quiera incluir una nueva condición. Aparecerá abajo un nuevo menú como el de la *figura 48*, donde definir la condición de contorno que se desea. Dentro del menú, deberá seleccionarse si se desea aplicar dicha condición a un punto, línea, superficie o volumen, junto con las direcciones dónde se quiere fijar la condición. Las condiciones fijadas en el modelo junto con sus variables se listan a continuación:

Condición 1: Seleccionando elemento “*Lines*” y activándola en las direcciones X e Y.

Condición 2: Seleccionando elemento “*Lines*” y activándola en las direcciones X y Z.

Condición 3: Seleccionando elemento “*Surfaces*” y activándola en la dirección X.

Condición 4: Seleccionando elemento “*Surfaces*” y activándola en la dirección X. Además, esta última condición es la que se encarga de definir el desplazamiento que sufre la pieza. Por ello debe seleccionarse la pestaña “*Values*” e introducir en la dirección X el valor de la deformación que se quiere imponer. En el caso de estudio se definió un valor de deformación de 0.034 metros.

Como último paso en cada condición, para que éstas queden asignadas al elemento que se desee, debe clicarse el botón “*Select*” presente en el mismo menú y seleccionar en la geometría el elemento al que se quiere asignar la condición, seguidamente pulsar la tecla “*Esc*” y el botón “*OK*” en el menú.

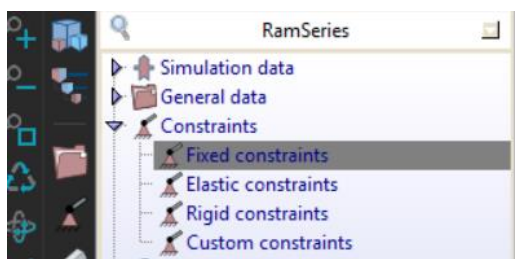


Figura 47. Detalle de la selección en el menú de *RamSeries* para poder editar en el menú de condiciones de contorno – Fuente propia

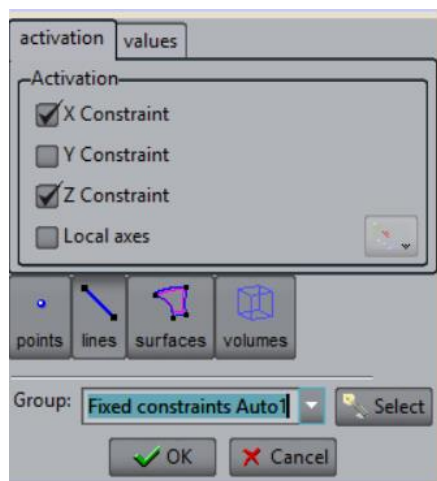


Figura 48. Menú para asignar las condiciones de contorno a la geometría - Fuente propia

### 9.3 Asignación del material del que está conformada la geometría

Este paso debe realizarse para que el programa permita hacer un primer cálculo sobre el modelo creado y genere el archivo “.dat” desde donde se introducirán las características que realmente se desea que tengan los diferentes materiales que conforman la pieza. El procedimiento que seguir para introducir las propiedades definitivas de los materiales se explicará en el apartado 9.5, ya que este capítulo pretende guiar al usuario cronológicamente paso por paso. A continuación, se explicará cómo realizar esta primera asignación de material al modelo:

En primer lugar, en el mismo menú que se ha empleado para definir las condiciones de contorno, seleccionar el desplegable “*Materials and properties*” > “*Solids*” > “*Plasticity solid*”, seguidamente aparecerá un menú complementario donde se puede seleccionar el material deseado dentro de una lista que incluye el programa y asignarlo a la geometría deseada. En el caso que nos ocupa se ha seleccionado como material “*Steel A52 P*”. Para asignar el material a la geometría, se procede del mismo modo que con las condiciones de contorno. Primero clicar el botón del menú “*Select*” y seguidamente seleccionar en la pantalla la geometría a la que se desea aplicar dicha condición de material, en nuestro caso es a todo el volumen de la pieza. Por último, presionar la tecla “*Esc*” y el botón “*OK*” del menú. Una vez se han asignado las condiciones de contorno y el material a la geometría, se recomienda guardar el caso de estudio

para poderlo recuperar si se necesita, además de que el software no deja calcular posteriormente el comportamiento del modelo si no se ha guardado.

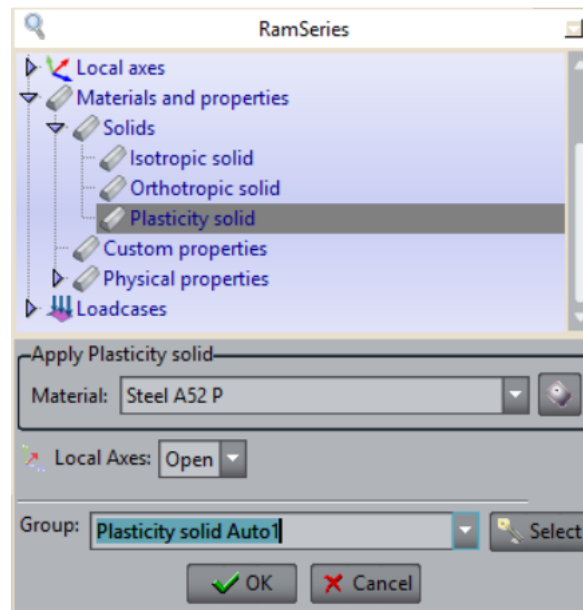


Figura 49. Detalle del menú de asignación de material en RamSeries - Fuente propia

## 9.4 Definición del mallado y sus propiedades

Para definir y crear la malla necesaria para que el software pueda calcular, entre otras variables, las deformaciones y tensiones que sufre la pieza, tendrán que dirigirse en primer lugar a la barra de herramientas superior, en la sección “Mesh”. Dentro del desplegable que aparece, seleccionar “Structured” > “Volumes” > “Assign size”. Seleccionamos la geometría y presionamos “Esc”, aparecerá un menú en la pantalla donde introducir el valor del tamaño que se desea que tenga cada elemento de la malla. En nuestro caso, el tamaño de elemento introducido ha sido de 1 metro. Una vez introducido el valor, presionar “Esc” y volver a seleccionar la geometría en la pantalla, seguidamente presionar dos veces “Esc”. Ya se ha introducido el tamaño de los elementos de la malla deseada, ahora solo queda definir el tipo de elemento deseado. En el caso de estudio la geometría de la pieza es cubica por lo que, para que el mallado se adapte lo máximo posible a dicha forma, deberá seleccionarse un tipo de elemento hexaédrico. Para ello, dentro de la sección “Mesh” clicar la opción “Element type” > “Hexahedra”. Seguidamente seleccionar en la pantalla la geometría y presionar “Esc”. Por último, solo quedará generar la malla definida. Para generarla dirigirse de nuevo a la sección “Mesh” > “Generate mesh” > “Generate”. En la pantalla, el dibujo de la geometría cambiará seguidamente y se mostrará el mallado que se ha generado en ella como se pudo observar en la figura 28. Una vez se ha generado la malla, para poder continuar se debe guardar el modelo que se ha implementado.

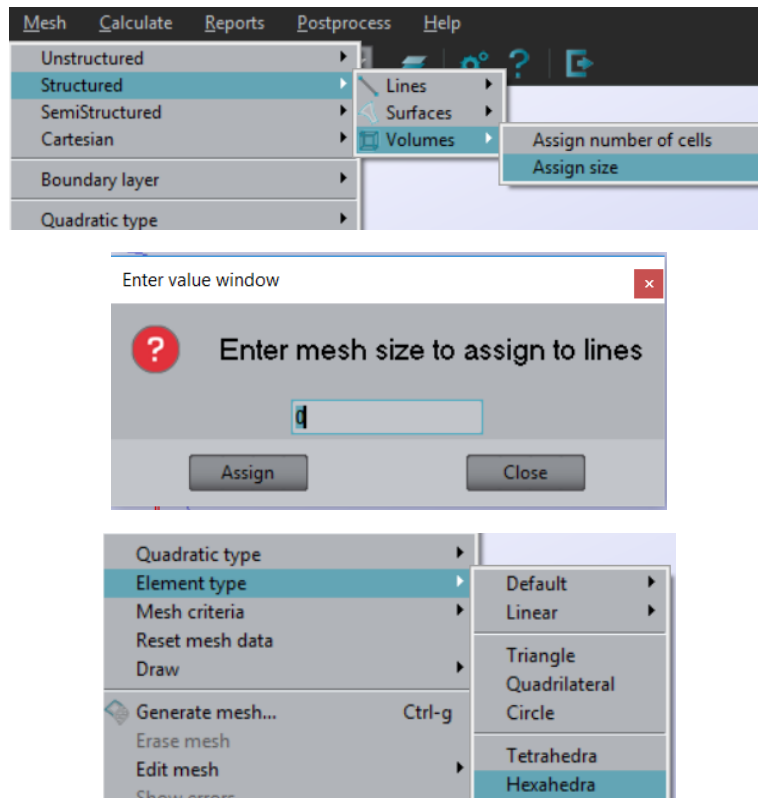


Figura 50. Detalle de las selecciones a realizar para la definición del mallado. De arriba abajo: Selección de la forma de definición del mallado, determinación del tamaño de elemento y selección del tipo de elemento – Fuente propia

## 9.5 Cálculo del caso creado y modificación del archivo *.dat* que se genera

Una vez se ha generado la malla deseada en la geometría, el programa ya está listo para poder calcular el comportamiento del modelo diseñado. Para que el programa calcule, se puede clicar en la barra de herramientas superior la opción “Calculate” > “Calculate” o se puede hacer clic en el icono que aparece en la barra lateral izquierda. Una vez el programa haya finalizado el cálculo, aparecerá un mensaje en la pantalla preguntando si se desea ir al apartado de postproceso o seguir en el de preproceso. Clicar la opción “OK” y cerrar el software ya que por el momento se han finalizado las tareas a realizar en éste.

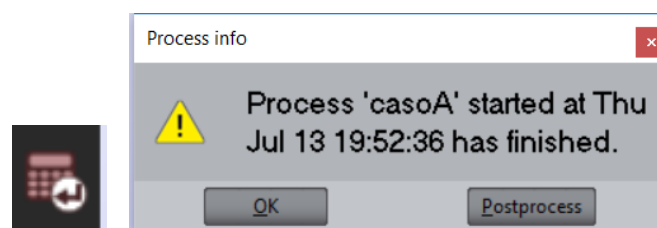


Figura 51. Izquierda: detalle del botón a clicar para calcular. Derecha: mensaje que aparece una vez finalizado el cálculo - Fuente propia

Es importante durante el proceso de cálculo ir observando la ventana “info” que puede desplegarse clicando el icono de la *figura 52*, para controlar que los cálculos que va realizando el programa en cada incremento van convergiendo.



**Figura 52. Detalle del botón para desplegar la ventana “info” durante el cálculo del software - Fuente propia**

Al acabar el cálculo que realiza el software se generan una serie de archivos dentro de la carpeta *.gid* que se guardó en el directorio deseado. Dentro de la carpeta *.gid* se encuentra el archivo *.dat*, este archivo deberá copiarse en otra carpeta desde donde el ejecutable que se utilizará para el cálculo del comportamiento del material pueda leerlo y generar los archivos de resultados. Una vez copiado, se abrirá con la utilidad *Bloc de notas* de Windows para proceder a su edición. El archivo *.dat* es el que muestra todos los datos del caso necesarios para que el programa calcule y simule el comportamiento del material asignado a la pieza. Como se indicó en el apartado 8.3, se asigna inicialmente un único material (acero) a la geometría, pero el material que se desea que tenga ésta es un material compuesto de determinadas características. Las características del material deberán introducirse editando el archivo *.dat*. Como el material compuesto que se quiere estudiar tiene dos tipos diferentes de laminado formados por las mismas fibras y matrices, uno orientado a noventa grados y el otro a cero grados, deberán introducirse dos tipos diferentes de laminado. Cada uno formado a su vez por un tipo de fibra y un tipo de matriz que tienen una participación volumétrica determinada. Los dos laminados que se definan tendrán también una participación volumétrica dentro del material dependiendo de las capas que tengan y conformarán el compuesto del que se desea que esté hecha la pieza a simular. Por lo tanto, deberán introducirse en el archivo dos fibras, dos matrices, dos laminados y un compuesto.

Seguidamente se listarán los materiales a introducir con sus propiedades:

- 1) Fibra 1:
  - Módulo de Young: 74000000000 Pa
  - Coeficiente de Poisson: 0.25
  - Tipo de comportamiento: Daño
  - Límite elástico: 2000000000 Pa
  - Energía de fractura: 21000000  $J/m_2$
- 2) Fibra 2
  - Módulo de Young: 74000000000 Pa
  - Coeficiente de Poisson: 0.25
  - Tipo de comportamiento: Daño

Límite elástico: 2000000000 Pa

Energía de fractura: 21000000  $J/m_2$

- 3) Matriz 1

Módulo de Young: 3000000000 Pa

Coeficiente de Poisson: 0.35

Tipo de comportamiento: Daño

Límite elástico: 12000000 Pa

Energía de fractura: 400000  $J/m_2$

- 4) Matriz 2

Módulo de Young: 3000000000 Pa

Coeficiente de Poisson: 0.35

Tipo de comportamiento: Daño

Límite elástico: 12000000 Pa

Energía de fractura: 400000  $J/m_2$

- 5) Laminado 1

Formado por: Fibra 1 y Matriz 1

Participación volumétrica de la fibra: 50 %

Participación volumétrica de la matriz: 50 %

Angulo: 0 radianes

- 6) Laminado 2

Formado por: Fibra 2 y Matriz 2

Participación volumétrica de la fibra: 50 %

Participación volumétrica de la matriz: 50 %

Angulo: 1.57079632679 radianes (90 grados)

- 7) Compuesto:

Formado por: Laminados 1 y 2

Participación de cada laminado: 50 %

Una vez se ha editado el archivo, se guardará en la carpeta desde donde el ejecutable lo leerá y generará los resultados del caso implementado.



## 9.6 Cálculo del caso con el ejecutable y visualización de resultados en el postproceso

Para poder obtener los resultados definitivos del caso que se quiere estudiar, debe accionarse el ejecutable desde la aplicación de Windows: *Símbolo de sistema*. De esta forma, el programa lee la información introducida en el archivo *.dat*, calcula el comportamiento del material y genera un nuevo archivo que contiene los resultados del caso. Dicho archivo es el que tiene la extensión *.flavia*. El archivo que genera el ejecutable debe copiarse dentro de la carpeta *.gid* creada con anterioridad por el software al guardar el modelo creado. Una vez realizada esta tarea, se puede abrir el archivo *.gid* desde cualquiera de los software, *Ramseries* o *GiD*, para visualizar desde el apartado de postproceso los resultados que se han generado. El software permite visualizar gran cantidad de datos de la simulación como las deformaciones y tensiones sufridas en la pieza en las diferentes direcciones de los ejes de coordenadas o el porcentaje de daño que han sufrido fibras y matrices. Si se desea conocer más sobre la visualización de los resultados, tanto los resultados numéricos obtenidos como el procedimiento a seguir para plotear las curvas de dichos resultados en el software se ha mostrado en el Capítulo 8.



## Capítulo 10. Conclusiones

Durante la realización de este trabajo se ha estudiado el comportamiento que tienen los materiales compuestos y las distintas formas que existen en la actualidad para caracterizarlo. Se ha podido observar que los ensayos físicos a materiales son una herramienta muy útil pero altamente costosa debido a que cualquier modificación en las propiedades del material o forma de la probeta de ensayo conlleva a la repetición del ensayo por completo. Además, resulta físicamente imposible realizar ensayos a estructuras completas debido a las dimensiones reales y a la complejidad que éstas pueden llegar a alcanzar. Por lo que el estudio del comportamiento completo de la estructura se limita a estimaciones basadas en ensayos realizados a probetas conformadas del mismo material del que están construidas dichas estructuras. Por otro lado, gracias a la ingeniería y a la informática, existen métodos de simulación computacional que resultan aptos para poder estudiar el comportamiento de un determinado material sin necesidad de ensayar, reiterada y físicamente, el elemento del cual se quiere analizar su comportamiento. Por lo tanto, estos métodos sí que podrían ser capaces de analizar el comportamiento de una estructura al completo, ya que no se está ensayando la estructura físicamente, si no que el estudio se basa en los cálculos de una simulación numérica. Hasta hace relativamente poco tiempo, estas simulaciones solo eran capaces de obtener el comportamiento en el rango lineal del material, pero recientemente se han implementado formulaciones capaces de simular también el comportamiento no-lineal del material. Este segundo comportamiento resulta especialmente interesante en los materiales compuestos debido a sus características ortótropas, ya que pueden simularse de esta forma las propiedades del material que deben reforzarse para soportar situaciones de carga hipotéticas durante su vida útil en ciertas aplicaciones, como pueden ser las que se dan en estructuras navales. Por todas estas razones, resultaba interesante comprobar si es realmente cierto que los métodos y formulaciones desarrolladas hasta la fecha son capaces de simular al completo el comportamiento que presenta un determinado material compuesto bajo unas condiciones de carga y deformación impuestas. Para ello, una vez encontrada alguna referencia de ensayos reales a materiales compuestos desde donde poder obtener sus propiedades mecánicas características, se procedió a intentar simular el comportamiento descrito por el material durante el ensayo mediante la utilización de uno de los métodos de simulación empleados para este fin. Si se lograba simular el comportamiento, quedaría comprobado que este tipo de formulaciones son capaces de llevar a cabo su función satisfactoriamente.

En lo que se refiere a la valoración de los resultados numéricos del ensayo obtenidos. Se puede concluir, por una parte, que el comportamiento que describe el material implementado se asemeja completamente al que se introduce y define en la formulación empleada para el cálculo del modelo implementado. Esto es así debido a que los datos observados afirman que la formulación de la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo empleada para el cálculo, muestra satisfactoriamente los comportamientos que los diferentes componentes del material compuesto del modelo deben seguir, dependiendo de la orientación que tengan en el material respecto a la dirección de aplicación de la tensión que se le aplica. De esta forma, se observa que el laminado a cero grados presenta efectivamente un comportamiento de iso-deformación, debido a que se encuentra en paralelo, mientras que el laminado a noventa grados presenta un comportamiento de iso-tensión, debido a que se encuentra en serie. Por lo tanto, la formulación empleada de la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo caracteriza el comportamiento de los elementos constitutivos del material correctamente.

Por otro lado, después de realizar las comprobaciones y validaciones pertinentes al cotejar la curva obtenida con el software y la curva del ensayo, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1. Se ha comprobado que la formulación empleada es capaz de obtener el comportamiento del rango lineal del material. Debido a que es posible asemejar la pendiente inicial de la curva del cálculo numérico del software con la del ensayo de laboratorio del material. Por lo tanto, se deduce que en la actualidad somos capaces de obtener la rigidez del compuesto.
2. Como se observa en la comparación de las curvas obtenidas de tensión/deformación del ensayo y del software, existe cierta divergencia entre los resultados que calcula la herramienta numérica y los resultados que se obtienen en el ensayo en el rango no-lineal de endurecimiento del material. Esto es a consecuencia del modelo de daño implementado para el cálculo computacional que, en este caso, no admite comportamientos mixtos de ablandamiento – endurecimiento del material. Debería implementarse en un futuro una nueva formulación que incluyese un modelo de endurecimiento – ablandamiento para permitir simular conductas del material similares a la observada en el caso de estudio.
3. Pese a lo expuesto en el punto anterior, con la formulación empleada somos capaces de asemejar el rango no-lineal de ablandamiento del material que se origina debido a la rotura gradual de las fibras que conforman los laminados hasta llegar al punto de rotura del compuesto.

Por lo tanto, se debe seguir trabajando en la implementación de mejores modelos de formulación que permitan asemejar al máximo las curvas de comportamiento del material en el rango no-lineal. Por el momento, la divergencia que se presenta entre los resultados se puede considerar un error asumible, ya que somos capaces de obtener en buena medida el comportamiento general del material compuesto.

Asimismo, durante todo el proceso de aprendizaje realizado mientras se desarrollaba el trabajo, he podido llegar a una serie de conclusiones, a título personal, referentes a distintos puntos estudiados durante este periodo:

- Al conocer el amplio abanico de aplicaciones que los materiales compuestos tienen en la industria naval, junto con la posibilidad de modificar según convenga sus características principales, me he percatado de que el futuro de los materiales en la construcción de embarcaciones de todo tipo va dirigido casi exclusivamente al ámbito de los compuestos. Los avances tecnológicos y sociales requieren, cada vez más, de soluciones “a la carta” de los problemas que se van presentando en cada tipo de industria. Esta es, para mí, una de las razones principales para atreverme a prever que en un futuro próximo comenzarán a incluirse los materiales compuestos en aplicaciones en las que antes era impensable incluirlos como, por ejemplo, en el ámbito de las embarcaciones mercantes.
- Por otro lado, he podido observar la importancia que tienen tanto los ensayos que se realizan a los materiales compuestos como los recientes programas informáticos capaces de reproducir el comportamiento de los *composites*. Estos programas representan un gran avance en cuanto a la capacidad de análisis del comportamiento estructural de cualquier armadura o elemento dado, permitiendo prever de una forma más fehaciente la conducta de una estructura frente a una hipotética situación, sin necesidad de que la estructura esté ya construida. De esta forma, estos materiales permiten ahorrar numerosos costes derivados de los posibles errores que la ingeniería pueda originar al no haber tenido posibilidad de adquirir datos o estimaciones del comportamiento de la estructura frente a una situación.
- Pese al punto anterior, resulta conveniente seguir invirtiendo en la investigación y desarrollo para la implementación de nuevas teorías y modelos descriptivos del comportamiento de los materiales. Ya que, como se ha observado en el caso de validación realizado, la formulación que se emplea en la actualidad no acaba de generar unos resultados que imiten al completo el comportamiento no-lineal del material.
- En cuanto al software empleado, he encontrado que *RamSeries* y *GiD* son unas herramientas muy completas y útiles, tanto para la validación del comportamiento de materiales compuestos, como para el cálculo posterior de cualquier problema estructural que se plantee, una vez incluido el material en la interfaz.

- No obstante esto y, siendo consciente de la poca experiencia inicial que tenía con estos programas, debo decir que debería procurarse enfocar la interfaz del software a un mayor uso a nivel usuario. Con esto me refiero que resulta complicado, incluso después de semanas de trabajo con el programa, comprender la forma cómo calcula y trabaja. Seguramente esto es debido en parte a la complejidad teórica y técnica de las formulaciones que se emplean para lograr obtener el comportamiento de los materiales.
- También debo hacer especial mención a que, después de pasar numerosas jornadas en las instalaciones del Centro Internacional de Métodos Numéricos para la Ingeniería (CIMNE) viendo cómo trabaja parte del equipo de ingenieros que llevan a cabo sus investigaciones allí, debería valorarse mucho más la labor que estos desempeñan detrás de los programas e investigaciones que conciben. Por poner un ejemplo que lo ilustre, después de todo el procedimiento, tiempo y trabajo empleado para desarrollar este proyecto, se acaba condensando todo en un simple “clic” a la hora de seleccionar un material dentro de la cartera de materiales predeterminados que el programa incluye y que ha sido desarrollada, tras la pantalla, gracias al trabajo de estas personas.

Por último, me gustaría volver atrás en el tiempo y hacer una valoración personal sobre todo lo aprendido y trabajado. Hace escasos dos meses y medio, me presentaba en el despacho de mi tutor de proyecto solicitándole ayuda para cambiar urgentemente la temática de mi trabajo final de carrera. La temática que me propuso implicaba conocimientos de dos ramas que eran prácticamente desconocidas para mí: materiales compuestos y software para el análisis estructural. Dado el escaso tiempo del que disponía para acabar el proyecto, me amedrentaba indagar en un mundo desconocido. Pese a esto, decidí salir de mi zona de confort y volcarme por completo en el nuevo tema escogido. Realmente, no era del todo consciente de la cantidad de horas que debía implicar finalizar un proyecto de tal envergadura, con una temática que no dominaba y en un tiempo escaso. Pero gracias a la ayuda de mi tutor y a la perseverancia se pudo lograr el objetivo marcado.

Para la realización de este proyecto, he debido adquirir y ampliar diferentes conocimientos que al inicio del trabajo no tenía. Como, por ejemplo, los escasos conocimientos que tenía sobre los materiales compuestos y sobre el software *RamSeries*; los modelos de comportamiento existentes que pueden seguir los *composites*; qué es y qué implica la validación de un material; las teorías y herramientas matemáticas disponibles para permitir calcular numéricamente el comportamiento de un material, entre otros. Todo esto me ha permitido asumir una nueva forma de ver y razonar a la hora de analizar el modo de comportamiento que tiene un material. Hecho que me permite apreciar la complejidad intrínseca que tienen los materiales compuestos que, a su vez, considero que es su mayor ventaja.

Gracias a este trabajo he podido aprender algunos métodos innovadores empleados para la validación de materiales y para conocer el comportamiento de estos frente a distintas situaciones. Además, me he familiarizado con diferentes programas informáticos que he ido utilizando a lo largo del proyecto como *RamSeries*, *MatLab* o *GiD*. Esto ha conllevado un incremento de mis aptitudes informáticas. Pese a esto, considero más importante las bases que me han permitido asentar los diferentes temarios estudiados y, que me han proporcionado una capacidad de visualización, síntesis y análisis que antes no tenía sobre los resultados obtenidos de los ensayos y de los que facilita el software.

Debido a la escasez de tiempo y a los diferentes obstáculos que se han ido presentando durante estos meses, también he aprendido a trabajar bajo presión durante el proceso y he podido experimentar mi capacidad de adaptación a las nuevas condiciones que se presentaban ante mí. Creo que este punto me resultará francamente útil debido a la forma de trabajo que actualmente existe en el mundo laboral que encontraré al graduarme.

Finalmente, me gustaría valorar positivamente los resultados finales obtenidos en la validación. Obviamente, soy consciente que hay aspectos mejorables y, que existen otros que se deben modificar obligatoriamente si se pretende alcanzar por completo el objetivo prefijado. Pero en general, considero que el conjunto de resultados ha sido el esperado y además, gracias a los conocimientos adquiridos, he sido capaz de argumentar las razones por las que se presentaba una pequeña divergencia en los resultados.





## Bibliografía

- [1] «Compass Webpage». [En línea]. Disponible en: <http://www.compassis.com/compass>. [Accedido: 13-jul-2017].
- [2] «CIMNE. International Centre for Numerical Methods in Engineering.» [En línea]. Disponible en: <http://www.cimne.com/>. [Accedido: 13-jul-2017].
- [3] «Embarcaciones egipcias Ilustración». [En línea]. Disponible en: <http://www.icarito.cl/2009/12/embarcaciones-egipcias.shtml/>. [Accedido: 09-jul-2017].
- [4] R. A. Shenoi y J. F. Wellicome, Eds., *Composite Materials in Maritime Structures*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [5] «HanseYachts». [En línea]. Disponible en: <https://www.hanseyachts.com/es>. [Accedido: 08-jun-2017].
- [6] «Subsea Umbilicals Risers Flowlines smart solution by Bardot Group». [En línea]. Disponible en: <https://subsea-umbilicals-risers-flowlines.com/>. [Accedido: 08-jun-2017].
- [7] «Presente y Futuro de los Materiales Compuestos (Composites). Blog | Ixstitute». [En línea]. Disponible en: <http://ixtitude.com/presente-y-futuro-de-los-materiales-compuestos-composites-aplicaciones/>. [Accedido: 09-jun-2017].
- [8] «Destroyer deckhouse roof meets U.S. Navy fire code with phenolic composite : CompositesWorld». [En línea]. Disponible en: <http://www.compositesworld.com/articles/destroyer-deckhouse-roof-meets-us-navy-fire-code-with-phenolic-composite>. [Accedido: 05-jun-2017].
- [9] F. Rastellini, S. Oller, O. Salomón, y E. Oñate, «Composite materials non-linear modelling for long fibre-reinforced laminates», *Comput. Struct.*, vol. 86, n.º 9, pp. 879-896, may 2008.
- [10] X. Martínez, S. Oller, y F. Rastellini, «Análisis no-lineal de materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie-paralelo», en *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*, OmniaScience, 2014, pp. 237-260.
- [11] W. Roundi, A. El Mahi, A. El Gharad, y J.-L. Rebière, «Experimental and numerical investigation of the effects of stacking sequence and stress ratio on fatigue damage of glass/epoxy composites», *Compos. Part B Eng.*, vol. 109, pp. 64-71, 2017.
- [12] G. (Ed. . Lubin y G. (Ed. . Lubin, *Handbook of Fiberglass and Advanced Plastic Composites*. Huntingdon NY, 1975.
- [13] A. Besednjak, *Materiales compuestos Procesos de fabricación de embarcaciones*. 1ªed.España: UPC, 2005. ISBN 978-84-8301-820-0
- [14] «ASTM International - Standards Worldwide». [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/>. [Accedido: 09-jul-2017].
- [15] A. Miravete y E. Larrodé, *Materiales compuesto, Tomo II. 1ª ed.* Zaragoza : Reverte, S.A.,2007. ISBN 978-84-921349-7-7
- [16] «Ensayo de Tracción para láminas de Composite utilizando Extensómetros Automáticos (ASTM D3039) - Instron». [En línea]. Disponible en: <http://www.instron.com.ar/es-ar/testing-solutions/by-material/composites/tension/composite-laminates>. [Accedido: 09-jun-2017].
- [17] «Ensayo de materiales en composites para construcciones ligeras - Metalmecánica». [En línea]. Disponible en: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/133568-Ensayo-de-materiales-en-composites-para-construcciones-ligeras.html>. [Accedido: 09-jun-2017].

- [18] «Instron: Máquinas de ensayo de materiales para Tracción, Fatiga, Impacto, Reología y Ensayos Estructurales - Instron». [En línea]. Disponible en: <http://www.instron.com.ar/es-ar/>. [Accedido: 09-jul-2017].
- [19] X. Martínez, S. Oller, y E. Barbero, «Caracterización de la delaminación en materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie/paralelo», *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.*, vol. 27, n.º 3, pp. 189-199, 2011.
- [20] L. Ortiz Berrocal, «Efecto poisson», 1998. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente\\_de\\_Poisson](https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_Poisson). [Accedido: 04-jul-2017].
- [21] M. J. (Mike J. . Hinton, A. S. Kaddour, y P. D. (Peter D. . Soden, *Failure criteria in fibre reinforced polymer composites : the World-Wide Failure Exercise - Section 2 -Chapter 2.1*. Elsevier, 2004.
- [22] T. Final de Grado, C. Pérez Alonso, y X. Martínez García, «Naval Composites: Los materiales compuestos y la industria naval».
- [23] M. A. H. J.C.Suarez, «MODOS DE FALLO EN MATERIAL HÍBRIDO PARA CONSTRUCCIÓN NAVAL».
- [24] E. Greene, *MARINE COMPOSITES, Second edition*. Annapolis, Mariland 21403: Eric Greene Associates, Inc., 1999. ISBN 0-9673692-0-7
- [25] «El barco pesquero del futuro construido con materiales compuestos DIAB». [En línea]. Disponible en: <https://www.diabgroup.com/es-ES/Cases/Marine/The-fishing-boat-of-the-future-built-in-DIAB-composite-material>. [Accedido: 12-jun-2017].
- [26] R. M. Jones, *Mechanics of composite materials*. 1ª ed. Philadelphia: Taylor & Francis, Inc., 1999. ISBN 1-56032-712-X
- [27] Tutorial *RamSeries*
- [28] Tutotial *GiD*
- [29] Tutorial *MatLab*